

S02230/2

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A ELEKTROTECHNICKÁ V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra výroby a rozvodu
elektrické energie

ELEKTRÁRNY II.

Prof. Ing. Zbyněk I b l e r DrSc

Ing. Miloš B e r o n DrSc

Ediční středisko VŠSE Plzeň

Plzeň 1982

Fakulta elektrotechnická

Katedra výroby a rozvodu elektrické energie

SM 2230 2

15. VI. 1995

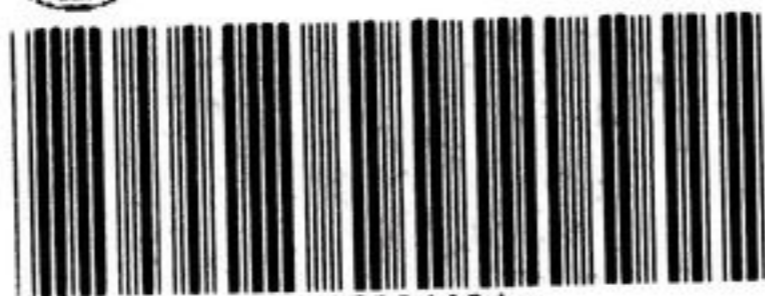
ELEKTRÁRNY II.

Prof. Ing. Zbyněk IBLER, DrSc

Ing. Miloš BERAN, CSc



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA



3143004604

NENIČ MĚ

29. března 1984

639/84

Vysoká škola strojní a elektrotechnická
v Plzni
kalhovna

© Prof. Ing. Zbyněk Ibler, DrSc., Ing. Miloš Beran, CSc.
Plzeň 1982

P ř e d m l o v a

Toto skriptum vychází jako dočasná učební pomůcka pro překlenutí doby nutné k vydání celostátní vysokoškolské učebnice ve Státním nakladatelství technické literatury. Je určeno pro studenty studia denního i dálkového na studijním oboru 26 - 34 - 8 Elektroenergetika všech elektrotechnických fakult v ČSSR. Skriptum vzniklo z přednášek autorů na VŠSE v Plzni.

V rámci obsahové přestavby studia na vysokých školách, provedené koncem sedmdesátých let byl předmět Elektrárny II. rozšířen a zabývá se výhradně elektrickou částí elektráren. Zde jde o první skriptum v tomto pojetí, určené speciálně pro studijní obor Elektroenergetika.

Skriptum navazuje na předměty teoretického základu, předměty aplikace teoretického základu a předměty odborné základní. Jde zejména o poznatky z teoretické elektrotechniky, elektrických strojů, přístrojů a strojního zařízení elektráren.

Říjen 1982

Autoři

O B S A H

| | | | |
|----------|--|-----|----|
| 1. | Úvod | ... | 5 |
| ○ 1.1. | Perspektiva čs.energetiky v oblasti zdrojů | ... | 5 |
| ○ 1.1.1. | Konvenční parní elektrárny | ... | 5 |
| ○ 1.1.2. | Jaderné elektrárny | ... | 5 |
| ○ 1.1.3. | Vodní elektrárny | ... | 6 |
| 1.2. | Elektrická část elektráren | ... | 6 |
| ○ 1.2.1. | Elektrická schemata kondenzačních elektráren a tepláren | ... | 8 |
| ○ 1.2.2. | Elektrická schemata jaderných elektráren | ... | 12 |
| ○ 1.2.3. | Elektrická schemata vodních elektráren | ... | 15 |
| 1.3. | Vlastní spotřeba elektrické energie elektráren | ... | 16 |
| ○ 1.3.1. | Vlastní spotřeba kondenzačních elektráren a tepláren | ... | 17 |
| ○ 1.3.2. | Vlastní spotřeba jaderných elektráren | ... | 18 |
| 1.3.3. | Vlastní spotřeba vodních elektráren | ... | 20 |
| 1.3.4. | Příklady schémat vlastní spotřeby elektrické energie kondenzačních elektráren a tepláren | ... | 20 |
| 1.3.5. | Příklady schémat vlastní spotřeby elektrické energie jaderných elektráren | ... | 27 |
| 1.3.6. | Příklady elektrických schémat vodních elektráren | ... | 35 |
| 1.4. | Zdroje vlastní spotřeby elektrické energie | ... | 38 |
| 1.4.1. | Doběhové zdroje | ... | 38 |
| 1.4.2. | Nouzové zdroje v konvenčních elektrárnách | ... | 39 |
| 1.4.3. | Nouzové zdroje v jaderných elektrárnách | ... | 41 |
| 1.4.4. | Výpočet velikosti zdrojů vlastní spotřeby | ... | 42 |
| 1.5. | Pohony a jiné spotřebiče ve vlastní spotřebě elektrické energie elektráren | ... | 45 |
| 1.5.1. | Pohony v konvenčních tepelných elektrárnách | ... | 48 |
| 1.5.2. | Pohony ve vodních elektrárnách | ... | 49 |
| 1.5.3. | Pohony a spotřebiče v jaderných elektrárnách | ... | 49 |
| 1.5.4. | Volba elektromotorů pro pohony zařízení vlastní spotřeby elektráren | ... | 51 |
| 1.5.5. | Chránění asynchronních motorů vn | ... | 61 |

vnější zkrat

| | | |
|-----------------|--|-------------------|
| ○ 1.5.6. | Volba napětí vlastní spotřeby elektrické energie | ... 64 |
| 1.5.7. | Kontrola navrženého výkonu zdrojů elektrické energie ve vlastní spotřebě elektráren | ... 64 |
| 1.6. | Výpočet poměrů při zkratech ve vlastní spotřebě elektrické energie elektráren | ... 79 |
| ○ 1.6.1. ✓ | Dimensování elektrických zařízení podle účinků zkratových proudů <i>symet + dynamické</i> | ... 81 |
| 1.7. | Zkoušky ve vlastní spotřebě elektrické energie elektráren | ... 86 |
| 1.8. | Mimořádné provozní stavy ve vlastní spotřebě elektrické energie elektráren | ... 87 |
| ✓ 1.9. | Metoda spolehlivostního výpočtu silnoproudých schemat vlastní spotřeby elektrické energie elektráren | ... 88 |
| ✓ 1.9.1. | Modely k určování spolehlivosti systému | ... 93 |
| 1.9.2. | Aplikace dvojího charakteru poruchovosti elektrických prvků ve spolehlivostním schématu | ... 97 |
| ✓ 1.9.3. | Postup spolehlivostní analýzy systému | ... 99 |
| ○ 2.1. ✓ | Elektrotechnická zařízení elektráren | ... 100 |
| ○ 2.1.1. ✓ | Alternátory | ... 100 |
| ○ 2.1.2. | Transformátory v elektrárnách | ... 136 |
| ○ 2.1.3. | Vyvedení výkonu z alternátoru ✓ | ... 138 |
| ○ 2.2. | Provoz elektrických strojů a zařízení elektráren | ... 148 |
| ○ 2.2.1. | Provoz alternátorů ✓ | ... 148 |
| ○ 2.2.2. | Provoz transformátorů ✓ | ... 186 |
| ○ 3.1. | Elektrické ochrany bloku alternátor - blokový transformátor - transformátor vlastní spotřeby | ... 191 |
| ○ 3.1.1. | Ochrany transformátorů | ... 208 |
| ○ 3.1.2. | Ochrany alternátorů | ... 213 b |
| ○ 3.2.1. | Regulace napětí alternátorů | ... 229 |
| ○ 3.2.2. | Regulace kmitočtu a předávaného výkonu v ES | ... 238 |
| ○ 3.2.3. | Bloková dozorna | ... 254 |
| ○ 3.2.4. | Komplexní automatizace elektráren | ... 257 |

symetrická reakce

volba alternátoru

vnější zkrat

S e z n a m o b r á z k ů

| | | Strana |
|------------|---|--------|
| Obr. 1.1 | Schéma s jednoduchým systémem přípojníc | ... 7 |
| Obr. 1.2 | Schéma se dvěma systémy přípojníc | ... 7 |
| Obr. 1.3 | Typické elektrické schéma a řešení vlastní spotřeby elektrické energie blokových kondenzačních elektráren | ... 8 |
| Obr. 1.4 | Schéma bez alternátorového vypínače | ... 9 |
| Obr. 1.5 | Schéma s alternátorovým vypínačem za odbočkou vlastní spotřeby | ... 10 |
| Obr. 1.6 | Schéma s alternátorovým vypínačem před odbočkou vlastní spotřeby | ... 10 |
| Obr. 1.7 | Schéma s alternátorovým vypínačem | ... 11 |
| Obr. 1.8 | Zapojení alternátorů na dvě napětí v teplárnách | ... 11 |
| Obr. 1.9 | Schéma pro jaderné elektrárny | ... 13 |
| Obr. 1.10 | Schéma s vypínači na straně vn a vvn | ... 13 |
| Obr. 1.11 | Schéma s vypínači na straně vn | ... 14 |
| Obr. 1.12 | Schéma jaderného bloku s větším počtem vypínačů | ... 14 |
| Obr. 1.13 | Schéma pro dva napěťové rozdílné systémy vvn | ... 15 |
| Obr. 1.14 | Schéma H | ... 16 |
| Obr. 1.15 | Čtyřúhelníkové schéma | ... 16 |
| Obr. 1.16 | Elektrické schéma čs. kondenzační elektrárny | ... 21 |
| Obr. 1.17a | Elektrické schéma elektrárny s bloky 200 MW | ... 22 |
| Obr. 1.17b | | ... 23 |
| Obr. 1.18 | Elektrické schéma kondenzační elektrárny v SSSR | ... 24 |
| Obr. 1.19 | Elektrické schéma kondenzační elektrárny v NSR | ... 25 |
| Obr. 1.20 | Elektrické schéma teplárny | ... 26 |
| Obr. 1.21 | Elektrické schéma větší teplárny | ... 27 |
| Obr. 1.22 | Schéma vlastní spotřeby elektrické energie bloku jaderné elektrárny (V1) | ... 28 |
| Obr. 1.23 | Elektrické schéma bloku jaderné elektrárny s reaktory VVER 440 | ... 29 |
| Obr. 1.24 | Varianty vyvedení výkonu jaderných bloků 1300 MW | ... 31 |
| Obr. 1.25 | Funkční rozdělení nouzového napájení | ... 32 |
| Obr. 1.26 | Návrh schéma vlastní spotřeby bloku s reaktorem typu VVER 1000 | ... 34 |
| Obr. 1.27 | Elektrické schéma přečerpávací vodní elektrárny v dvoustrojovém provedení .. | 35 |
| Obr. 1.28 | Elektrické schéma přečerpávací vodní elektrárny v třístrojovém provedení .. | 37 |
| Obr. 1.29 | Zdroje pro nouzové napájení elektrárenského bloku | ... 40 |
| Obr. 1.30 | Zbytkové teplo v reaktoru po zapůsobení havarijní ochrany reaktoru | ... 41 |
| Obr. 1.31 | Soustrojí poháněné dvěma leteckými motory | ... 44 |
| Obr. 1.32 | Elektrické schéma zapojení plynového soustrojí | ... 45 |
| Obr. 1.33 | Momentová charakteristika stroje se stálým zatěžným momentem | ... 46 |
| Obr. 1.34 | Závislost poměrného momentu zatížení na otáčkách | ... 47 |
| Obr. 1.35 | Momentové charakteristiky asynchronních motorů | ... 53 |
| Obr. 1.36 | Momentová charakteristika pohonu a zatížení | ... 54 |
| Obr. 1.37 | Průběh záběrového proudu pro různá technologická zařízení | ... 55 |
| Obr. 1.38 | Postup při určení mechanické časové konstanty | ... 57 |
| Obr. 1.39 | Doběhová charakteristika | ... 59 |
| Obr. 1.40 | Závislost momentu na napětí | ... 60 |
| Obr. 1.41 | Závislost impedance motoru na skluzu | ... 61 |
| Obr. 1.42 | Schéma zapojení vlastní spotřeby pro výpočet | ... 65 |
| Obr. 1.43 | Náhradní schéma | ... 66 |
| Obr. 1.44 | Náhradní schéma napájení vlastní spotřeby | ... 68 |
| Obr. 1.45 | Upravené náhradní schéma | ... 68 |
| Obr. 1.46 | Schéma pro kontrolní výpočet rozběhu | ... 73 |

| | Strana |
|---|---------|
| Obr. 1.47 Náhradní schéma pro výpočet | ... 73 |
| Obr. 1.48 Náhradní schéma pro výpočet proudových a napěťových poměrů | ... 74 |
| Obr. 1.49 Schéma pro výpočet samonajíždění | ... 76 |
| Obr. 1.50 Náhradní schéma samonajíždění | ... 76 |
| Obr. 1.51 Schéma pro určení proudových a napěťových poměrů při samonajíždění | ... 77 |
| Obr. 1.52 Síly působící na podpěrku | ... 86 |
| Obr. 1.53 Seriové zapojení | ... 93 |
| Obr. 1.54 Paralelní zapojení | ... 94 |
| Obr. 1.55 Spolehlivostní blokové schéma systému | ... 94 |
| Obr. 1.56 Technické blokové schéma systému " 2 ze 3 " | ... 95 |
| Obr. 1.57 Spolehlivostní schéma | ... 96 |
| Obr. 1.58 Funkční schéma | ... 97 |
| Obr. 1.59 Schéma napájení přípojnic | ... 98 |
| | |
| Obr. 2.1 Plynové hospodářství alternátoru | ... 103 |
| Obr. 2.2 Válcová radiální ucpávka | ... 104 |
| Obr. 2.3 Čelní axiální ucpávka | ... 105 |
| Obr. 2.4 Základní schéma vodního okruhu alternátoru | ... 106 |
| Obr. 2.5 Charakteristiky alternátoru | ... 108 |
| Obr. 2.6 Schéma synchronního stroje | ... 109 |
| Obr. 2.7 Fázorový diagram synchronního alternátoru | ... 116 |
| Obr. 2.8 Statické momentové charakteristiky alternátoru | ... 117 |
| Obr. 2.9 Složky asynchronního momentu alternátoru | ... 119 |
| Obr. 2.10 Synchronní stroj se supravodivým budícím vinutím | ... 122 |
| Obr. 2.11 Charakteristika $U_b = f(t)$ | ... 124 |
| Obr. 2.12 Závislá budicí soustava s přímým řízením buzení | ... 126 |
| Obr. 2.13 Budicí soustava alternátoru s nepřímým řízením | ... 127 |
| Obr. 2.14 Budicí soustava s pomocným budičem | ... 128 |
| Obr. 2.15 Bezkroužková budicí soustava | ... 129 |
| Obr. 2.16 Odbuzovač s paralelním odporem | ... 130 |
| Obr. 2.17 Závislost proudu i_b na čase při odbuzení | ... 131 |
| Obr. 2.18 Schéma odbuzovače se zhášecí komorou | ... 132 |
| Obr. 2.19 Schéma obvodu při odbuzování | ... 133 |
| Obr. 2.20 Průběh proudu i_b při odbuzování | ... 134 |
| Obr. 2.21 Odbuzení turboalternátoru invertorovým chodem budicího systému | ... 135 |
| Obr. 2.22 Vyvedení výkonu vodní elektrárny | ... 137 |
| Obr. 2.23 Jmenovitá napětí a proudy turboalternátorů v závislosti na jejich výkonu | ... 139 |
| Obr. 2.24 Provedení zapouzdřených vodičů pro jmenovitý proud 10 kA | ... 140 |
| Obr. 2.25 Spojení pouzder vývodu alternátoru | ... 141 |
| Obr. 2.26 Rozložení intenzity magnetického pole uvnitř a vně zapouzdřeného vodiče | ... 142 |
| Obr. 2.27 Stanovení optimálního poměru proudů I_1 a I_2 s ohledem na minimální ztráty v pouzdře | ... 145 |
| Obr. 2.28 Vývod alternátoru velkého výkonu | ... 146 |
| Obr. 2.29 Provedení jedné fáze zapouzdřeného vodiče | ... 147 |
| Obr. 2.30 Fázování alternátoru při odchylce napětí | ... 150 |
| Obr. 2.31 Zásadní schéma fázovače | ... 154 |
| Obr. 2.32 Proudový fázorový diagram alternátoru | ... 156 |
| Obr. 2.33 Výkonový fázorový diagram alternátoru | ... 157 |

| | Strana | |
|------------------|--|-----------|
| Obr. 2.34 | Jednopolové schéma : alternátor - transformátor | ... 159 |
| Obr. 2.35 | Fázorový diagram zatížení alternátoru | ... 159 |
| Obr. 2.36 | Provozní P, Q diagram alternátoru | ... 160 |
| Obr. 2.37 | Fázorový diagram alternátoru a/ v přebuzení b/ v podbuzeném stavu | ... 162 |
| Obr. 2.38 | Oteplení stahovací desky statoru | ... 163 |
| Obr. 2.39 | Dovolené kapacitní zatížení alternátoru | ... 163 |
| Obr. 2.40 | Dovolené kapacitní zatížení alternátoru (při proměnné vnější reaktanci) | ... 164 |
| Obr. 2.41 | Závislost činného výkonu alternátoru na zátěžném úhlu | ... 165 |
| Obr. 2.42 | Nesymetrické zatížení alternátoru | ... 166 |
| Obr. 2.43 | Dovolené nesymetrické zatížení turboalternátoru 110 MW | ... 168 |
| Obr. 2.44 | Nastavení ochrany při nesymetrickém zatížení alternátoru | ... 169 |
| Obr. 2.45 | Dovolená nesouměrná zatížení turboalternátorů | ... 170 |
| Obr. 2.46 | Zapojení ochrany při nesymetrickém zatížení alternátoru | ... 170 |
| Obr. 2.47 | Závislost asynchronního momentu a výkonu na skluzu | ... 173 |
| Obr. 2.48 | Regulace výkonu při asynchronním chodu alternátoru | ... 174 |
| Obr. 2.49 | Asynchronní chod turboalternátoru | ... 175 |
| Obr. 2.50 | Ochrana při ztrátě buzení | ... 176 |
| Obr. 2.51 | Fázorový diagram alternátoru | ... 177 |
| Obr. 2.52 | Charakteristika ochrany při ztrátě buzení | ... 178 |
| Obr. 2.53 | Závislost napětí alternátoru na zatížení | ... 179 |
| Obr. 2.54 | Oblasti provozu alternátoru | ... 181 |
| Obr. 2.55 | Měření izolačního stavu budicího obvodu | ... 185 |
| | | |
| Obr. 3.1 | Charakteristika nadproudé ochrany časově nezávislé | ... 192 |
| Obr. 3.2 | Nadproudá ochrana časově nezávislá | ... 193 |
| Obr. 3.3 | Charakteristika nadproudé ochrany časově závislé | ... 193 |
| Obr. 3.4 | Nadproudá ochrana časově závislá | ... 194 |
| Obr. 3.5 | Nadproudá ochrana časově polozávislá | ... 194 |
| Obr. 3.6 | Chráněný objekt a tepelný model | ... 195 |
| Obr. 3.7 | Rozdílová ochrana s procentní stabilizací | ... 196 |
| Obr. 3.8 | Závislost $I = f(\Phi)$ | ... 198 |
| Obr. 3.9 | Určení velikosti $I_{mg \max}$ | ... 198 |
| Obr. 3.10 | Tříbodová rozdílová ochrana | ... 199 |
| Obr. 3.11a, b, c | Zapojení rozdílových ochran bloku | ... 199 |
| Obr. 3.12 | Zapojení rozdílových ochran dvojbloku | ... 200 |
| Obr. 3.13 | Budicí charakteristika JTP a její měření | ... 201 |
| Obr. 3.14 | Tříbodová rozdílová ochrana - zapojení JTP | ... 202 |
| Obr. 3.15 | Zapojení JTP a rozdílových ochran | ... 203 |
| Obr. 3.16 | Kompenzace rozdílových proudů | ... 203 |
| Obr. 3.17 | Vyrovnění proudů JTP rozdílové ochrany | ... 204 |
| Obr. 3.18 | Charakteristika rozdílové ochrany | ... 206 |
| Obr. 3.19 | Rozdílová ochrana přípojnic | ... 207 b |
| Obr. 3.20 | Zapojení sčítacího transformátoru | ... 207 b |
| Obr. 3.21 | Plynové - Buchholzovo relé | ... 208 |
| Obr. 3.22 | Zemní ochrana nádoby transformátoru | ... 209 |
| Obr. 3.23 | Poměry při zkratu na vedení vvn | ... 210 |

| | Strana |
|--|----------------|
| Obr. 3.24 Měření koeficientu k_v transformátoru | ... 211 |
| Obr. 3.25 Schéma pro výpočet zkratových poměrů | ... 211 |
| Obr. 3.26 Náhradní schéma | ... 213 a |
| Obr. 3.27 Zjednodušené schéma | ... 213 a |
| Obr. 3.28 Poměry při jednopólovém zkratu na transformátoru | ... 213 b |
| Obr. 3.29 Zemní spojení alternátoru | ... 214 |
| Obr. 3.30 Ochrana při zemním spojení ve statoru alternátoru | ... 215 |
| Obr. 3.31 Zapojení pro ladění tlumivky metodou přímou | ... 216 |
| Obr. 3.32 Ladění tlumivky nepřímou metodou podle rezonanční křivky | ... 217 |
| Obr. 3.33 Ochrana při zemním spojení alternátoru pracujícím přímo do přípojnic | ... 218 |
| Obr. 3.34 Ochrana při zemním spojení alternátoru pracujícím do kompenzované sítě | ... 219 |
| Obr. 3.35 Ochrana při zemním spojení rotoru alternátoru | ... 220 |
| Obr. 3.36 Zpětná wattová ochrana alternátoru | ... 221 |
| Obr. 3.37 Jednopólové a náhradní schéma bloku s vedením vvn | ... 222 a, b - |
| Obr. 3.38 Alternátor s magnetickou nesymetrií | ... 225 |
| Obr. 3.39 Měření kvality izolace stojanu alternátoru | ... 226 |
| Obr. 3.40 Ochrana při posuvu rotoru alternátoru | ... 226 |
| Obr. 3.41' Schéma regulace napětí | ... 230 |
| Obr. 3.42 Fázorový diagram pro zatížení alternátoru | ... 231 |
| Obr. 3.43 Charakteristika regulátoru pro $k_r = 0$ | ... 232 |
| Obr. 3.44 Stabilizační účinek blokového transformátoru | ... 233 |
| Obr. 3.45 Charakteristika regulátoru pro $k_r > 0$ | ... 234 |
| Obr. 3.46 Regulace buzení alternátoru | ... 235 |
| Obr. 3.47 Fázorový diagram vstupních hodnot regulace buzení | ... 235 |
| Obr. 3.48 Charakteristika regulátoru pro $k_r < 0$ | ... 236 |
| Obr. 3.49 Regulátor napětí | ... 237 |
| Obr. 3.50 Soustava energetického hospodářství | ... 238 |
| Obr. 3.51 Dispečerské řízení ES ČSSR | ... 240 |
| Obr. 3.52 Závislost $P, Q = F(f, U)$ | ... 239 |
| Obr. 3.53 Statická charakteristika zdroje | ... 241 |
| Obr. 3.54 Blokové schéma turbosoustrojí | ... 241 |
| Obr. 3.55 Statická charakteristika zátěže | ... 242 |
| Obr. 3.56 Blokové schéma spotřebního systému | ... 243 |
| Obr. 3.57 Statická charakteristika ES | ... 243 |
| Obr. 3.58 Závislost činného zatížení alternátoru, napětí a zátěžného úhlu | ... 246 |
| Obr. 3.59 Charakteristika $Q = f(U)$ | ... 246 |
| Obr. 3.60 Charakteristika $Q_z = f(U)$ | ... 247 |
| Obr. 3.61 Statická charakteristika $Q = f(U)$ | ... 247 |
| Obr. 3.62 Schéma regulace kmitočtu | ... 248 |
| Obr. 3.63 Příklad regulace kmitočtu | ... 250 |
| Obr. 3.64 Vazba regulátoru a ES ČSSR | ... 253 |
| Obr. 3.65 Schéma regulace výkonu v regulační elektrárně | ... 254 |
| Obr. 3.66 Rozměry pultů | ... 255 |
| Obr. 3.67 Půdorys dozorny jaderné elektrárny | ... 256 |
| Obr. 3.68 Řízení s použitím počítače mimo proces | ... 260 |
| Obr. 3.69 Použití počítače v otevřené smyčce | ... 260 |
| Obr. 3.70 Použití počítače v uzavřené smyčce | ... 261 |
| Obr. 3.71 Použití malých řídicích počítačů | ... 262 |

| | Strana | |
|-----------|--|---------|
| Obr. 3.72 | Strukturní schéma informačního a řídicího systému | ... 263 |
| Obr. 3.73 | Zjednodušené blokové schéma číslicového informačního systému CIS 3000 | ... 264 |
| Obr. 3.74 | Sestava CIS 3000 pro blok 200 MW | ... 265 |
| Obr. 3.75 | System Komplex Uran | ... 266 |
| Obr. 3.76 | Konfigurace řídicího systému vodní elektrárny | ... 268 |

SEZNAM TABULEK

| | Strana | |
|---------|---|---------|
| Tab. 1. | Rozběhy pohonů v elektrárně | ... 58 |
| Tab. 2. | Hodnoty materiálových konstant | ... 83 |
| Tab. 3. | Informativní spolehlivostní ukazatele zařízení ve vlastní spotřebě elektráren | ... 92 |
| Tab. 4. | Rozměry zapouzdřených vodičů | ... 147 |
| Tab. 5. | Charakteristické hodnoty K_{max} pro turboalternátory ŠKODA | ... 167 |
| Tab. 6. | Analogie tepelných a elektrických veličin | ... 195 |
| Tab. 7. | Působení ochran bloku | ... 228 |
| Tab. 8. | Počet kontrolovaných parametrů, ovládacích a regulačních povelů pro jednotlivé bloky | ... 258 |

1.0 Úvod

Závěry XVI. sjezdu KSČ ukládají čs. energetice vyrábět v roce 1985 80 až 83 miliardy kWh elektřiny, z toho 15 miliard kWh v jaderných elektrárnách. Hlavními zdroji pro výrobu elektřiny a tepla v ČSSR je uhlí a jaderné palivo. Kromě požadavků na výrobu jsou určeny úkoly pro zlepšení jakostních ukazatelů, spolehlivosti a hospodárnosti, rozvíjení kombinované výroby elektrické energie a tepla, centralizovaného zásobování teplem a ve spolupráci se SSSR další rozvoj jaderné energetického komplexu.

1.1. Perspektiva čs. energetiky v oblasti zdrojů

V současné době je instalovaný výkon elektráren v ČSSR větší než 18000 MW. Z toho největší část tvoří konvenční parní elektrárny (65,7 %), průmyslové elektrárny (14,4 %), vodní elektrárny (14,6 %), jaderné elektrárny (4,8 %) a elektrárny s plynovými turbínami (0,5 %). Maximální zatížení čs. elektrizační soustavy, pracující v propojené elektrizační soustavě " Mír " států RVHP dosahuje více jak 11500 MW.

1.1.1. Konvenční parní elektrárny

V nejbližší perspektivě budou uhelné elektrárny i při omezeném přírůstku uhlí zajišťovat rozhodující výrobu, jejich podíl na skladbě zdrojů bude ještě v roce 1990 činit asi 55%. Omezené možnosti získání energetického uhlí negativně ovlivňují výstavbu nových výkonů ve velkých elektrárenských blocích. Menší přírůstky fosilních paliv budou zhodnocovány v kombinované výrobě elektrické a tepelné energie výstavbou menších teplárenských zdrojů. Výrazné místo v perspektivě konvenčních tepelných elektráren má údržba a inovace základních fondů s cílem zvýšení spolehlivosti a výrobní schopnosti bloků, snížení pracnosti údržby, zvýšení účinnosti energetického procesu, přechodu vybraných kondenzačních bloků na teplárenský provoz, zvýšení stupně automatizace výrobního procesu, zlepšení životního prostředí a kulturnosti práce. Zvláště naléhavé je zajištění technického a výrobního řešení přizpůsobení bloků zhoršeným kvalitativním znakům uhlí z nových palivových základen a vývoj zařízení, které umožní spalovat i tzv. nebilanční uhlí. V další perspektivě při stále větším nasazení jaderných elektráren bude muset část základních kondenzačních bloků přejít na pološpičkový provoz, což vyžaduje seriózní technická řešení úprav zařízení k zajištění maximální ochrany materiálu v nestacionárních stavech, úprav spouštěcích okruhů a vyšší automatizaci spouštění a odstavení.

1.1.2. Jaderné elektrárny

Rozvoj jaderné energetiky je u nás jedinou cestou v zajištění rozhodujících přírůstků výroby elektrické a tepelné energie pro potřeby národního hospodářství a obyvatelstva v budoucím období. Čs. jaderný program je součástí výstavby jaderné energetiky členských států RVHP a v první etapě je u nás podle dohod mezi ČSSR a SSSR orientován na výstavbu elektráren s provozně ověřeným typem tlakového reaktoru typu VVER 440. V Jaslovských Bohunicích byl první blok tohoto typu uveden do provozu v roce 1978, druhý v roce 1980. Další dva bloky VVER 440 jsou ve výstavbě v Jaslovských Bohunicích, 4 bloky v Dukovanech a 4 bloky se připravují v SPLP pro Mochovce. V druhé etapě je výstavba jaderných elektráren orientována na bloky s větším jednotkovým výkonem s reaktory VVER 1000. První lokalitou pro výstavbu jaderné elektrárny s těmito reaktory je Temelín v jižních Čechách, kde počínaje přelomem 8. a 9. pětiletky budou do provozu postupně uvedeny 4 bloky, každý s výkonem 1000 MW. Osvojení výroby

a výstavby VVER 1000 umožní použít jaderného zdroje pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie s přímými dodávkami energie v páře nebo horké vodě pro průmyslové technologické procesy a komunální sféru.

Se zahájením výstavby jaderných elektráren s rychlými reaktory typu BN se vzhledem k současné úrovni technického řešení počítá až po roce 1990 (síť elektráren v jednotlivých zemích nebo v rámci integrovaného systému budování jaderných center).

1.1.3. Vodní elektrárny - akumulace, přečerpání

Potřeba přírůstků výroby elektrické energie vyžaduje využití i ostatních druhů energie. V úvahu přichází využití geotermální energie, slunečního záření a energie vodních toků. Prvé dvě možnosti budou mít v ČSSR jen lokální význam a nebudou mít podstatný vliv na řešení potřeb v oblasti elektrické energie. Potřebným a reálným je zvýšení využití hydroenergetického potenciálu vodních toků, protože z technicky využitelného potenciálu je u nás dosud využito asi 35 %. Ze studií vyplývá, že by bylo možno výhledově ve větších jednotkách instalovat asi 900 MW a roční výrobou 3,2 TWh. Z uvedeného výkonu jsou ve výstavbě základní díla Nagymaros a Gabčíkovo. Další skupina možné výstavby vodních děl je menších výkonů, v souhrnu s výkonem asi 360 MW a výrobou 830 GWh. Zbytek technicky využitelného potenciálu je rozdroben ve velkém počtu malých vodních elektráren, pro jejichž výstavbu je řešena unifikovaná řada malých turbin.

Pro potřeby elektrizační soustavy a vyrovnávání denního diagramu zatížení je zajišťována příprava a výstavba dalších přečerpacích vodních elektráren.

1.2. Elektrická část elektráren základy

Spolehlivá dodávka elektrické a tepelné energie je nutnou podmínkou pro zajištění plynulého chodu národního hospodářství a vysoké životní úrovně obyvatelstva. Výpadky v dodávkách elektřiny a tepla mohou způsobit podle charakteru odběratelů různé národohospodářské ztráty s případným dopadem i na životní úroveň obyvatelstva, na uchování dobrých postojů a nálad lidí, v případě vážných havárií mohou být ohroženy i lidské životy a životní prostředí v rozsáhlých oblastech.

K zásadním požadavkům spolehlivého provozu elektráren a tepláren patří spolehlivé a hospodárné vyvedení výkonu elektrárny a zajištění vlastní spotřeby elektrické energie pro pohony, měřicí a regulační přístroje a další spotřebiče. I když zařízení elektrické části elektráren z hlediska poruchovosti není obvykle kritickým místem, nutno však počítat s tím, že selhání vlastní spotřeby elektrické energie může mít nesmírné následky na škody celé elektrárny. Vlastní spotřeba rozhodujícím způsobem ovlivňuje provozní spolehlivost zejména při těžkých síťových poruchách, např. při selekci poruch nebo při obnovování systému po rozpadu elektrizační soustavy. K zajištění spolehlivé funkce vlastní spotřeby elektrické energie je kromě vysoce spolehlivého zařízení elektrické části nutný i bezvadný stav a funkce dalšího technologického zařízení, zejména turbosoustrojí. Je proto nutné, kromě bezpečné, spolehlivé projekce, výroby a montáže ověřovat spolehlivost vlastní spotřeby elektráren pro nestacionární stavy rizikovými zkouškami, t.j. vypínací zkoušky turboalternátoru, sjetí bloku na vlastní spotřebu a odzkoušení zásoků, včetně zajištěného napájení pod zatížením.

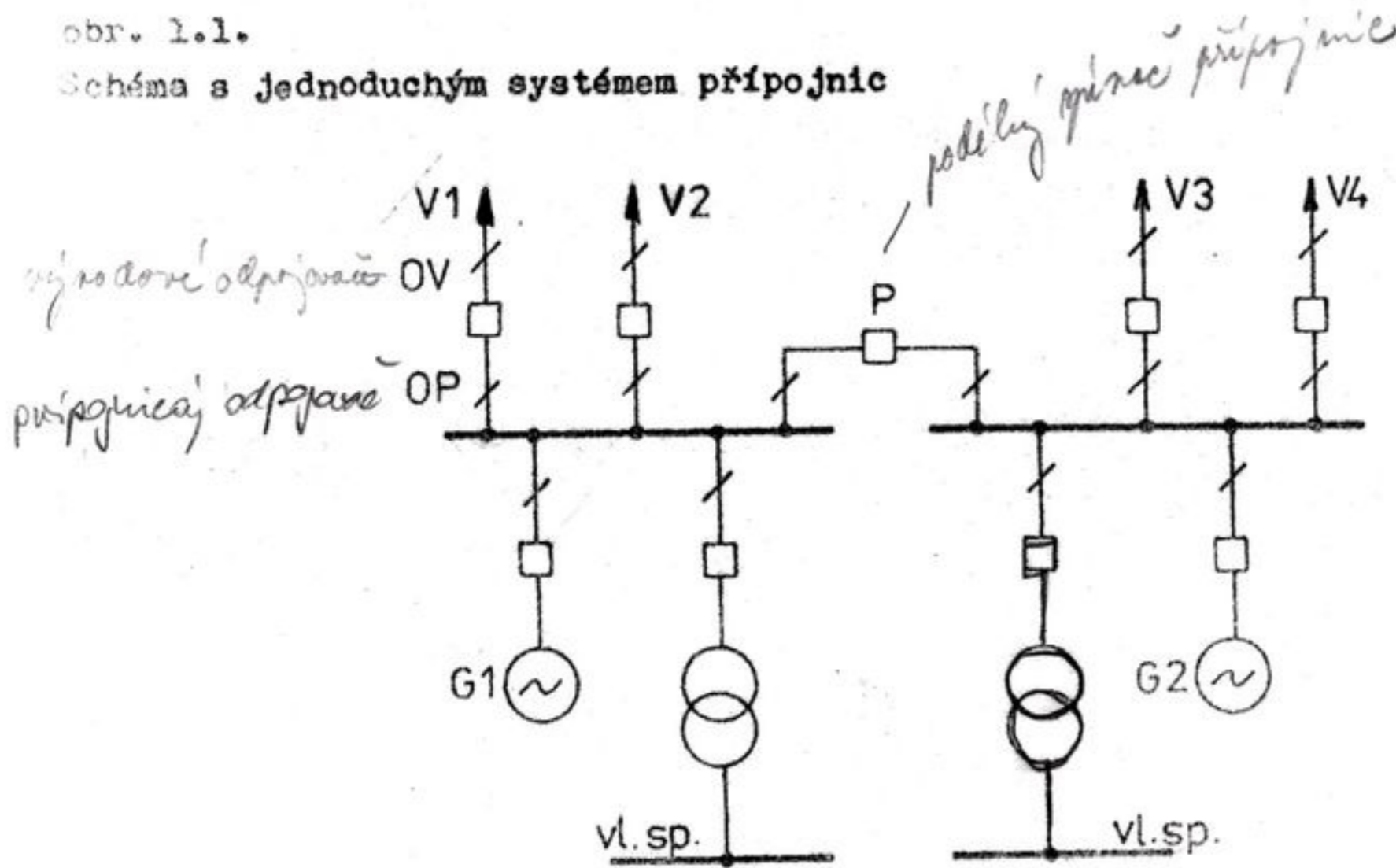
Elektrické schéma elektrárny

Elektrické schéma určuje způsob zapojení elektrárny do elektrizační soustavy, vyvedení výkonu elektrárny a zajištění spolehlivého napájení elektrických pohonů, potřebných pro výrobní proces. Při tvorbě schématu je nutno dbát na požadavky paralelního provozu, zapojení

ochran, z hlediska spolehlivosti na stupně důležitosti spotřebitelů elektrické energie a hospodárnost. Úloha zajištění napájení pomocných zařízení elektrárny se řeší v elektrickém schématu zapojení vlastní spotřeby elektrické energie. Hlavní elektrické schéma musí zajišťovat vysokou spolehlivost provozu, dostatečnou operativnost a vysokou hospodárnost.

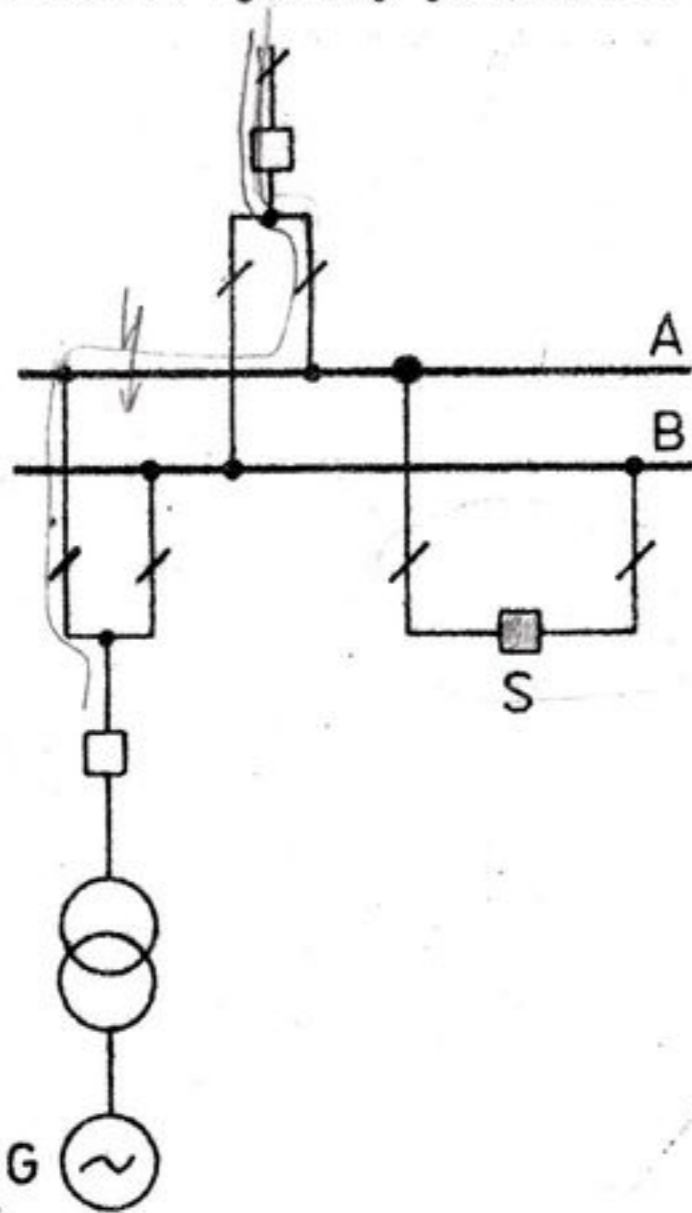
Nejjednodušším elektrickým schématem elektrárny je provedení s jednoduchým systémem přípojnic dle obr. 1.1., které je jednoduché a má nízké pořizovací náklady. Opravy vypínačů lze zajistit manipulacemi přípojnicovými (OP) a vývodovými (OV) odpojovači.

obr. 1.1.
Schéma s jednoduchým systémem přípojnic



Podélný spínač přípojnic P zvyšuje operativnost schématu; při údržbě nebo při zkratu na přípojnicích se odstaví jen polovina elektrárny. Nevýhodu odstavení poloviny alternátorů v uvedených případech lze odstranit použitím schéma se dvěma systémy přípojnic dle obr.1.2.

obr. 1.2.
Schéma se dvěma systémy přípojnic



Každý transformátor má svůj vypínač, který se připojuje dvěma odpojovači k oběma přípojnicím. Po odstavení soustrojí po konečném vypnutí vypínače, je možné vypnout i odpojovače této odbočky přípojnic, takže je vypínač bez napětí na obou stranách. Mechanické provedení odpojovačů a jejich kreslení ve schématech má být takové, aby nůž odpojovače ve vypnutém stavu byl bez napětí. Každý vývod (včetně vývodu alternátoru) možno převést za provozu z jednoho systému přípojnic na druhý pomocí příčného spínače přípojnic S. Další zlepšení vlastností schématu se dvěma systémy přípojnic se dosáhne pomocnou přípojnicí nebo i třetím systémem přípojnic. Vyšší počet přípojnic zvyšuje pořizovací náklady schématu. Předností schématu se dvěma přípojnicemi jsou však natolik významné, že toto schéma je nejčastěji používané. V poslední době se velké elektrárny u nás budují v blízkosti velkých

elektrických stanic, takže rozvodna u elektrárny často odpadá a výkon elektrárny se vyvede krátkým vedením do elektrické stanice.

U některých elektrických stanic nejvyšších napětí se z důvodů zajištění vysoké spolehlivosti provozu elektrizační soustavy používají dva vypínače pro jeden vývod nebo tři vypínače pro dva vývody. Tato schémata vykazují vyšší spolehlivost i operativnost než schéma v konvenčním provedení (s jedním vypínačem a dvěma přípojnicovými odpojovači pro každý vývod), protože provozní manipulace se zde provádějí pouze vypínači. Pořizovací náklady stanic ve výše uvedeném provedení jsou mnohem vyšší než stanice v normálním provedení a proto se takováto schémata skutečně používají jen výjimečně.

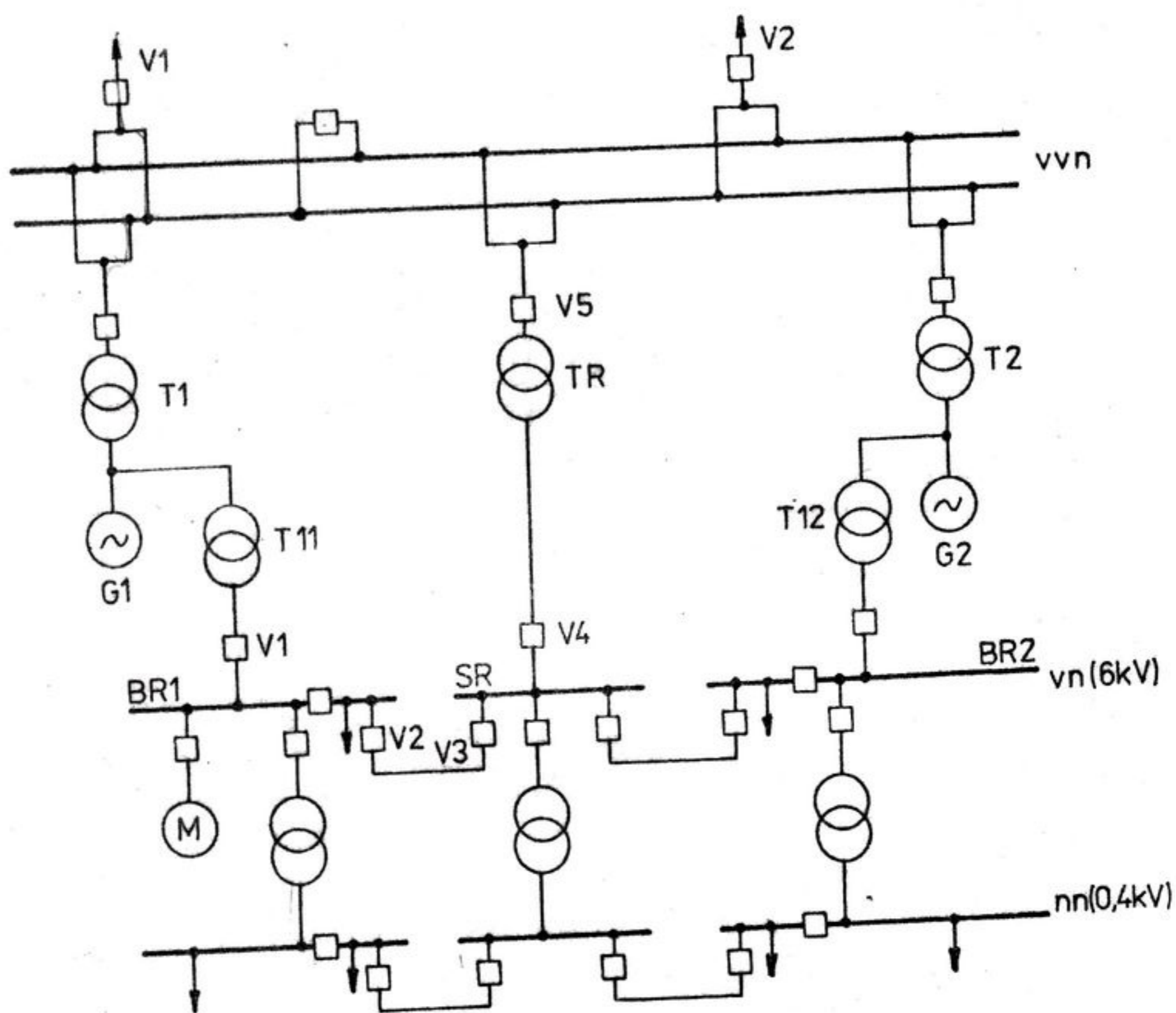
1.2.1. Elektrická schémata kondenzačních elektráren a tepláren

Současné a perspektivní tendence u nás a ve světě směřují k výstavbě elektrárenských bloků se stále větším jednotkovým výkonem. Důvodem pro to je zejména zkracování lhůt výstavby, úspora pořizovacích nákladů, úspora personálu a snížení měrné spotřeby paliva. U elektráren s blokovým uspořádáním je vlastní spotřeba elektrické energie dělena na blokovou a společnou.

U elektráren s blokovým uspořádáním výrobních jednotek je vlastní spotřeba obvykle napájena transformátorem na odbočce z vývodu alternátoru. Najížděcí zdroj tvoří transformátor, napájený zpravidla ze sítě 110 kV. Tento transformátor zajišťuje vlastní spotřebu elektrické energie při najíždění a odtavování bloku a tvoří také jeden z rezervních zdrojů.

obr. 1.3.

Typické elektrické schéma a řešení vlastní spotřeby elektrické energie blokových kondenzačních elektráren



Popis k obrázku 1.3.

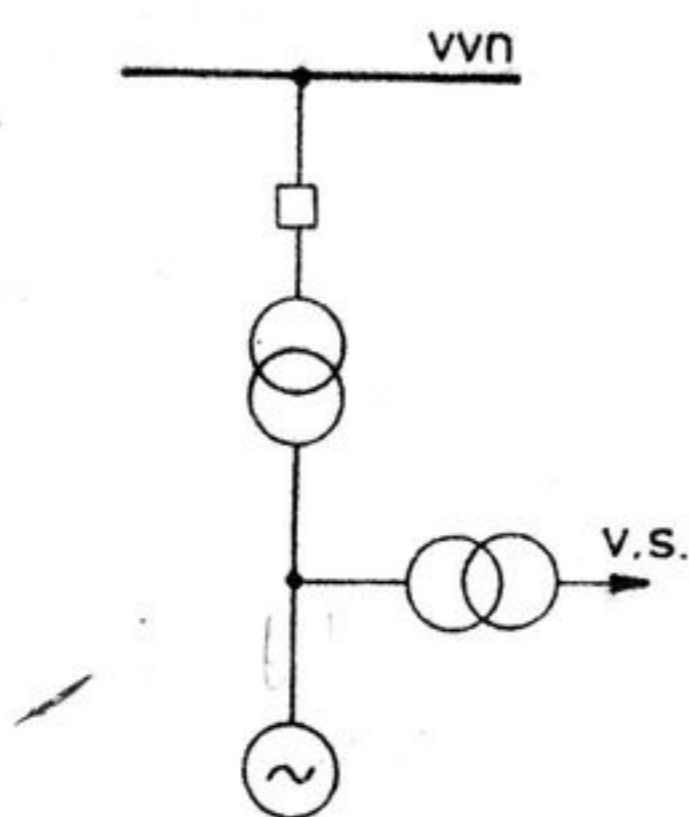
| | |
|----------|---|
| G1, G2 | alternátory |
| T1, T2 | blokové transformátory |
| T11, T12 | odbočkové transformátory (zajišťují pracovní napájení vlastní spotřeby elektrické energie) |
| TR | najížděcí (záložní) transformátor (zajišťuje najíždění, odstavení a zások vlastní spotřeby) |
| BR1, BR2 | blokové rozvodny |
| SR | společná rozvodna |
| V1, V2 | vývody pro vyvedení výkonu elektrárny |

Podle počtu bloků bývají instalovány 1 až 2 najížděcí transformátory. Při poruchách mezi alternátorem a sítí, při vypnutí alternátoru vlastní spotřeba zaskakuje na najížděcí transformátor. Další růst jednotkového výkonu elektrárenských bloků si vynutil nové řešení vývodu alternátoru s ohledem na napájení vlastní spotřeby. Důvodem bylo zvýšení jednotkového výkonu pohonů, které často přesahovalo možnosti napájení z najížděcího transformátoru. Také součtový výkon vlastní spotřeby přesahoval mnohdy možnosti běžných sítí. Proto se začala v posledních letech prosazovat koncepce, kde blokový transformátor přejímá část funkcí najížděcího transformátoru a sice napájení při najíždění a odstavení bloku. V této koncepci má potom najížděcí transformátor spíše funkci zásokového zdroje. Takovéto schema je možno uskutečnit pomocí alternátorových vypínačů, zapojených do vývodů alternátorů.

V zahraničí se někdy u elektráren s velkými bloky používají samostatné najížděcí zdroje, které tvoří spalovací turbina a alternátor (mohou mít funkci záložního i špičkového zdroje).

Schéma bez alternátorového vypínače

V obr. 1.4. je schéma napájení transformátoru vlastní spotřeby odbočením z vývodu alternátoru bez alternátorového vypínače.



Toto schéma nezbytně vyžaduje použití najížděcího transformátoru, který rovněž zajišťuje odstavení bloku a vykonává funkci záložního zdroje při všech poruchách v oblasti alternátor a první vypínač v.v.n.

Při odlehčení alternátoru, vyvolaném odpojením sítě zajišťuje alternátor bez přerušování napájení vlastní spotřeby. Toto schéma je nejlevnější, technicky jednoduché a přehledné z hlediska manipulací. Jeho použití je omezeno pro velké jednotkové výkony bloků, z dříve uvedených důvodů zvýšení jednotkového výkonu pohonů.

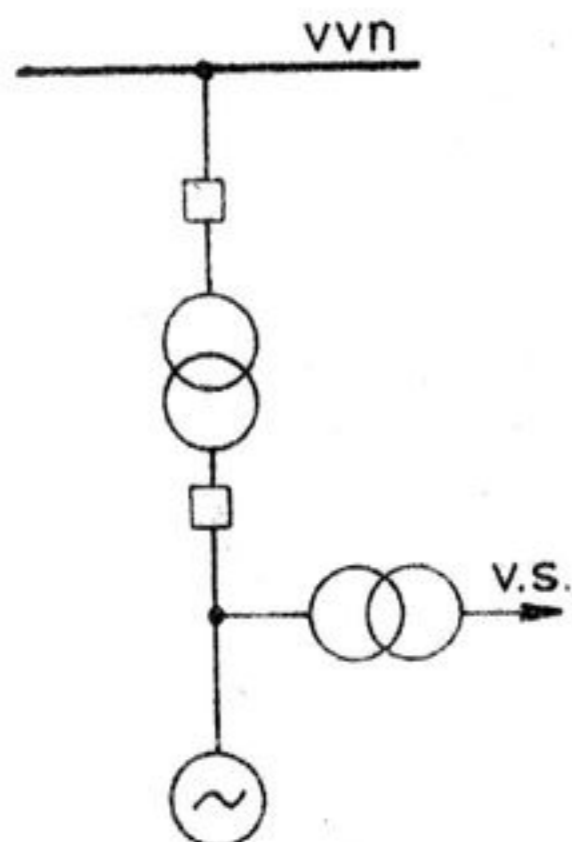
obr.1.4.

Schema bez alternátorového vypínače

Schéma s alternátorovým vypínačem

U schémat s větším počtem transformátorů vlastní spotřeby nebo s větším počtem blokových transformátorů je možno aplikovat různé zapojení alternátorových vypínačů, případně kombinaci s jinými výkonovými vypínači (vvn vypínače, zapouzdřené vypínače).

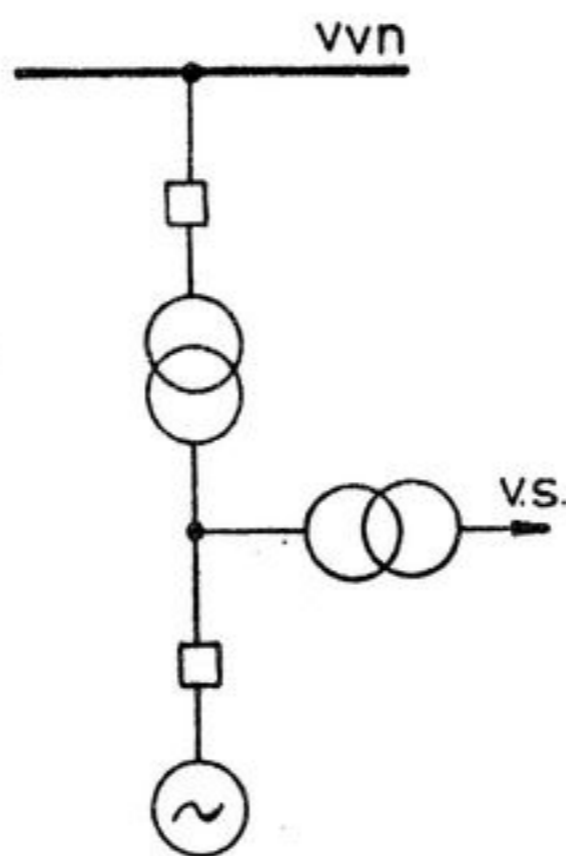
V obr. 1.5. je schéma, kde alternátorový vypínač je zabudován mezi odbočení k transformátoru vlastní spotřeby a blokový transformátor. Najížděcí transformátor je i zde nutný. Počet přeprnutí vlastní spotřeby na najížděcí transformátor se zmenší za předpokladu, že při odlehčení alternátoru, vyvolaném odpojením sítě nebo vypnutím alternátorového vypínače zaručí regulace turboalternátoru parametry, odpovídající výkonu vlastní spotřeby. Při poruchách v oblasti mezi alternátorovým vypínačem a systémem se tato část alternátorovým vypínačem odpojí a alternátor bez přerušeni napájí vlastní spotřebu. Schéma lze uplatnit v případech menších nároků na najížděcí transformátor.



obr. 1.5.

Schéma s alternátorovým vypínačem za odbočkou vlastní spotřeby

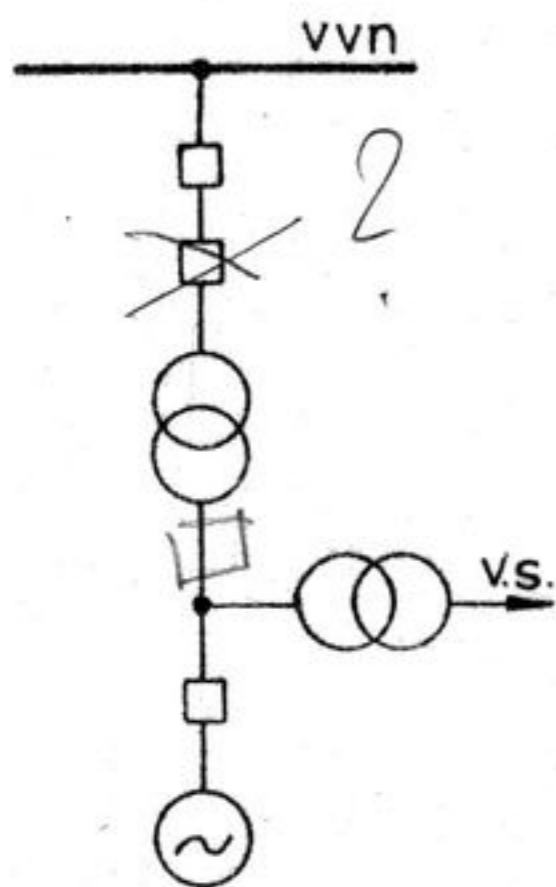
V obr. 1.6. je alternátorový vypínač zapojen mezi alternátor a odbočení transformátoru vlastní spotřeby. Toto schéma umožňuje najíždění bez najížděcího transformátoru, ovšem jen pro případ, kdy postačuje poruchové odstavení bloku (doběh) v případě poruchy v části mezi alternátorovým vypínačem a síťovou rozvodnou.



obr.1.6.

Schéma s alternátorovým vypínačem před odbočkou vlastní spotřeby

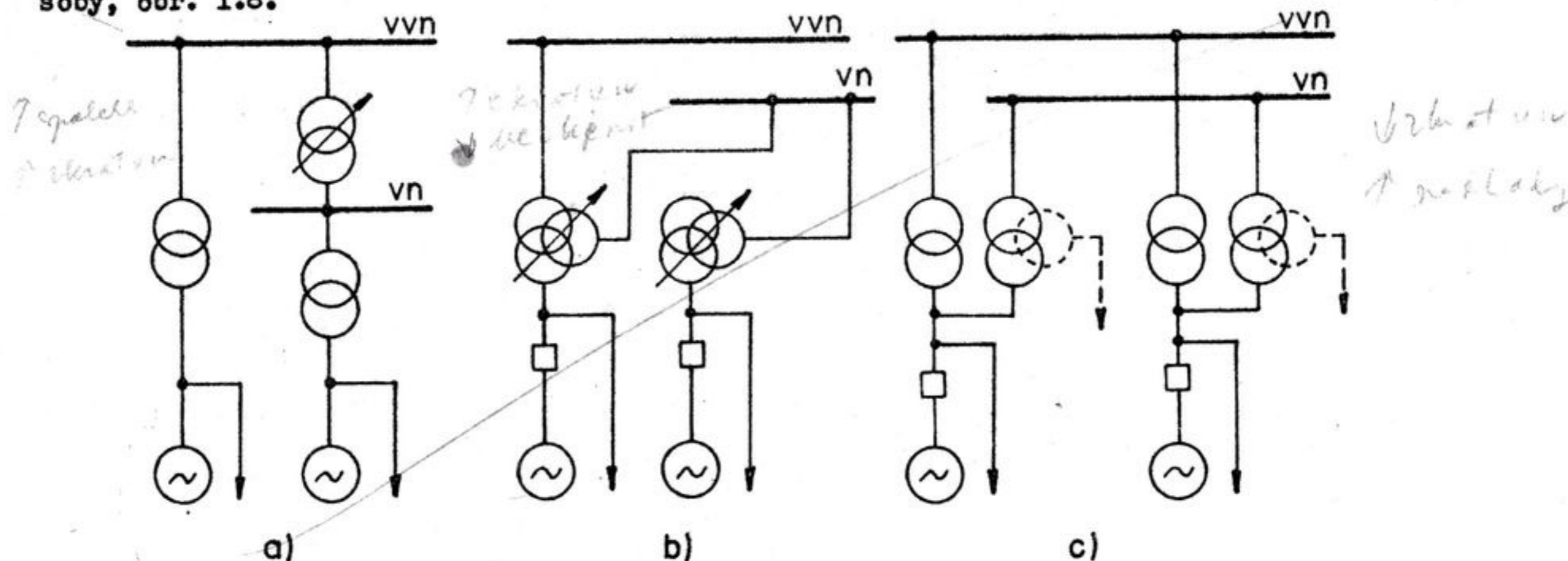
V obr. 1.7. je schéma, které spojuje výhody předchozích zapojení. Při instalaci alternátorového vypínače před odbočením transformátoru vlastní spotřeby a s vypínačem za blokovým transformátorem se snižuje požadavek přepínání vlastní spotřeby na případ poruchy v blokovém transformátoru nebo transformátoru vlastní spotřeby (za předpokladu spolehlivé regulace turboalternátoru při odlehčení po poruše).



obr. 1.7.
Schéma s alternátorovým vypínačem

Na závěr této části, zejména pro kondenzační elektrárny je třeba uvést, že schémata s alternátorovými vypínači (výkonové vypínače pro velké proudy, upravené pro instalaci do vývodu alternátoru) jsou obvykle nákladnější pro vysokou prodejní cenu těchto vypínačů. Alternátorový vypínač kromě dříve uvedených výhod jeho použití ve schématech vlastní spotřeby elektrické energie umožňuje rychlejší likvidaci zkratu než odbuzením alternátoru.

Řešení elektrických schémat tepláren je oproti kondenzačním elektrárnám, zejména pro menší teplárny poněkud odlišnější. Vlastní spotřeba tepláren bývá vyšší než u kondenzačních elektráren a musí být zajištěno krytí spotřeby páry resp. teplé vody i při poruchách v elektrické části. Z hlediska vyvedení výkonu a napájení vlastní spotřeby elektrické energie je nutno respektovat rozdílný provoz v různých ročních obdobích a poměry spotřeby v místě napojení na soustavu. Teplárny jsou obvykle situované v oblasti větších měst, takže je ekonomické, aby kryly místní spotřebu energie přímo, bez zbytečné mezitransformace. Pokud se uvažuje s dodávkami energie do elektrizační soustavy, musí být umožněno vyvedení výkonu do soustavy vvn. Zapojení alternátorů na dvě napětí se může uskutečnit několika způsoby, obr. 1.8.



obr. 1.8. Zapojení alternátorů na dvě napětí v teplárnách

Při provedení podle obr. 1.8. a) rozdělení bloku alternátor-transformátor na obě napětí, se obě napětí věžou spojovacím transformátorem. Výhodou je větší provozní spolehlivost. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady a při větších výkonech jsou problémy se zvládnutím zkratových výkonů v rozvodu vn.

Schéma podle obr. 1.8.b) se používá do výkonu jednotek asi 25 MW. Výhodou jsou nižší pořizovací náklady na transformátory a nižší ztráty. Nevýhodou je nižší provozní bezpečnost, nestandardní provedení transformátorů, nutnost použití regulačního transformátoru a alternátorového vypínače, zvýšení zkratových výkonů na vn.

U zapojení s dvěma blokovými transformátory, každý pro jedno napětí dle obr. 1.8.c) se podstatně snižují zkratové výkony v rozvodě vn a toto řešení se používá u jednotek většího výkonu. Schéma má vyšší pořizovací náklady na transformátory, regulaci a alternátorový vypínač. Kromě toho jsou větší ztráty při přenosu výkonu ze sítě vvn do vn, pokud není alternátor v provozu.

V současné době a v nejbližší perspektivě jsou zajišťovány rekonstrukce některých parních kondenzačních bloků pro teplárenský provoz. V těchto případech schémata vlastní spotřeby elektrické energie odpovídají elektrickým schématům kondenzačních elektráren.

1.2.2. Elektrická schémata jaderných elektráren

V jaderných elektrárnách je volba schématu podřízena v první řadě požadavku bezpečnosti reaktorové části. Pro napájení spotřebičů, zajišťujících dochlezení reaktoru a lokalizaci poruch v havarijních stavech musí být použito tři nezávislých systémů napájení. Každý z těchto zdrojů musí být schopen zajistit jadernou bezpečnost primárního okruhu v každém provozním stavu. Ostatní zařízení technologického procesu elektrárny musí být napájeny alespoň ze dvou nezávislých zdrojů. Struktura schématu napájení vlastní spotřeby jaderné elektrárny je tvořena systémem pracovního napájení, rezervního napájení a systémem zajištěného napájení.

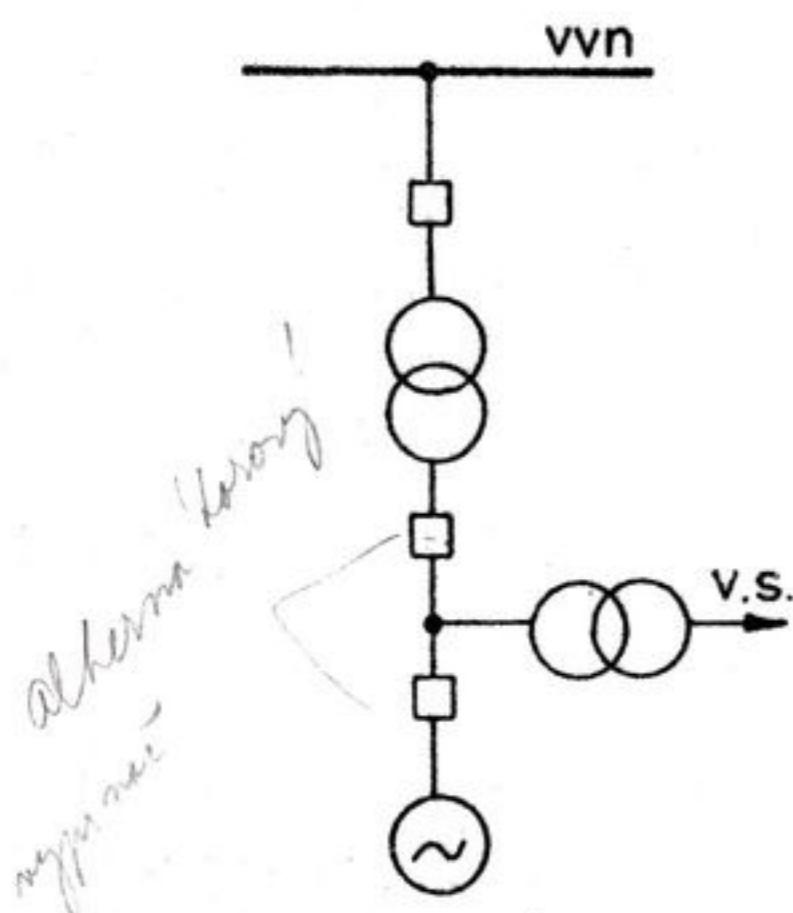
Napájení transformátoru vlastní spotřeby bývá zpravidla provedeno odbočením přímo z vývodu alternátoru, buď bez alternátorového vypínače, nebo s alternátorovým vypínačem. Vývod bez vypínače je nevýhodný u větších blokových výkonů, hlavně při najiždění a při některých poruchách. Přepínání vlastní spotřeby s napěťovou přestávkou na rezervní zdroj (transformátor) může vést k poruchám. Při přerušení, trvajícím asi 2 s se při připojení náhradního zdroje projeví pokles otáček pohonů velkým proudovým nárazem. U bloků velkých výkonů je pokles otáček výraznější, protože se zmenšuje poměr hmota/výkon. S ohledem na tyto podmínky lze sice pečlivým dimenzováním rozvodu a zkratového výkonu snížit riziko případných následných poruch, ale pro větší počet přístrojů rozvodu (zejména ochrany), které musí správně reagovat, je nebezpečí poruchovitosti při přepínání vlastní spotřeby elektrické energie větší než u ostatních operací. Pro u zvlášť velkých výkonů bloků je řešení vlastní spotřeby řešeno tak, že vypínače mezi alternátorem a blokovým transformátorem musí zvládnout jak provozní, tak poruchové stavy bez přepínání a rezervní zdroje (dieselagregáty, akumulátorové baterie) jsou použity pro poruchové odstavení bloku (doběh).

V jaderných elektrárnách je často používáno schéma podle obr. 1.9.

Zapojení s odbočením transformátoru vlastní spotřeby mezi dvěma alternátorovými vypínači ve vývodu alternátoru má výhody zapojení podle obr. 1.7. a navíc není třeba přepínat na rezervní zdroj ani při poruše na blokovém transformátoru.

Toto schéma vyžaduje vyšší pořizovací náklady a větší prostorové nároky. V praktických aplikacích se u tohoto schématu používá 2 blokových transformátorů a 2 transformátorů vlastní spotřeby.

Při spolehlivé funkci vypínačů, regulace turbíny a ochran je možno vypustit najížděcí zdroj a pravděpodobnost přepínání na rezervní zdroje (diselagregáty, akumulátorové baterie) je malá.

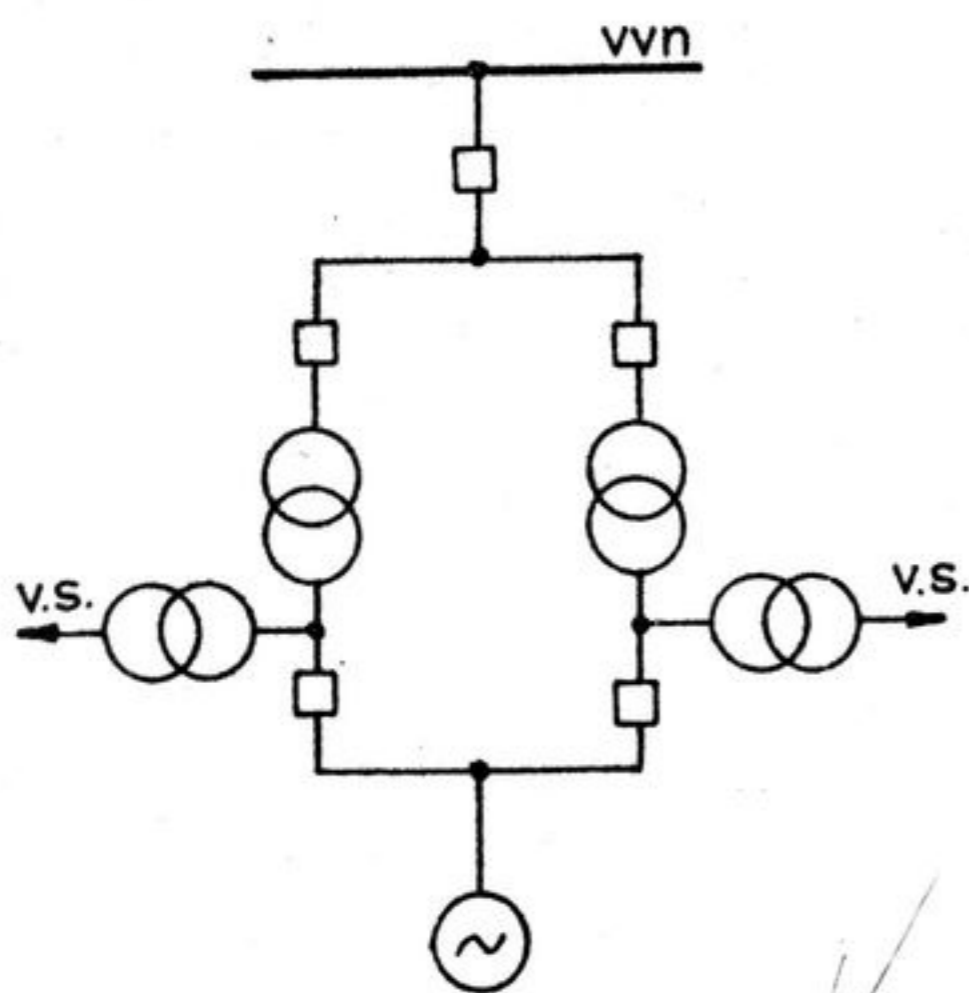


obr. 1.9.

Schema pro jaderné elektrárny

V obr. 1.10. je zapojení s odbočením pro transformátor vlastní spotřeby v oblasti blokového transformátoru a s vypínači na vn a vvn straně.

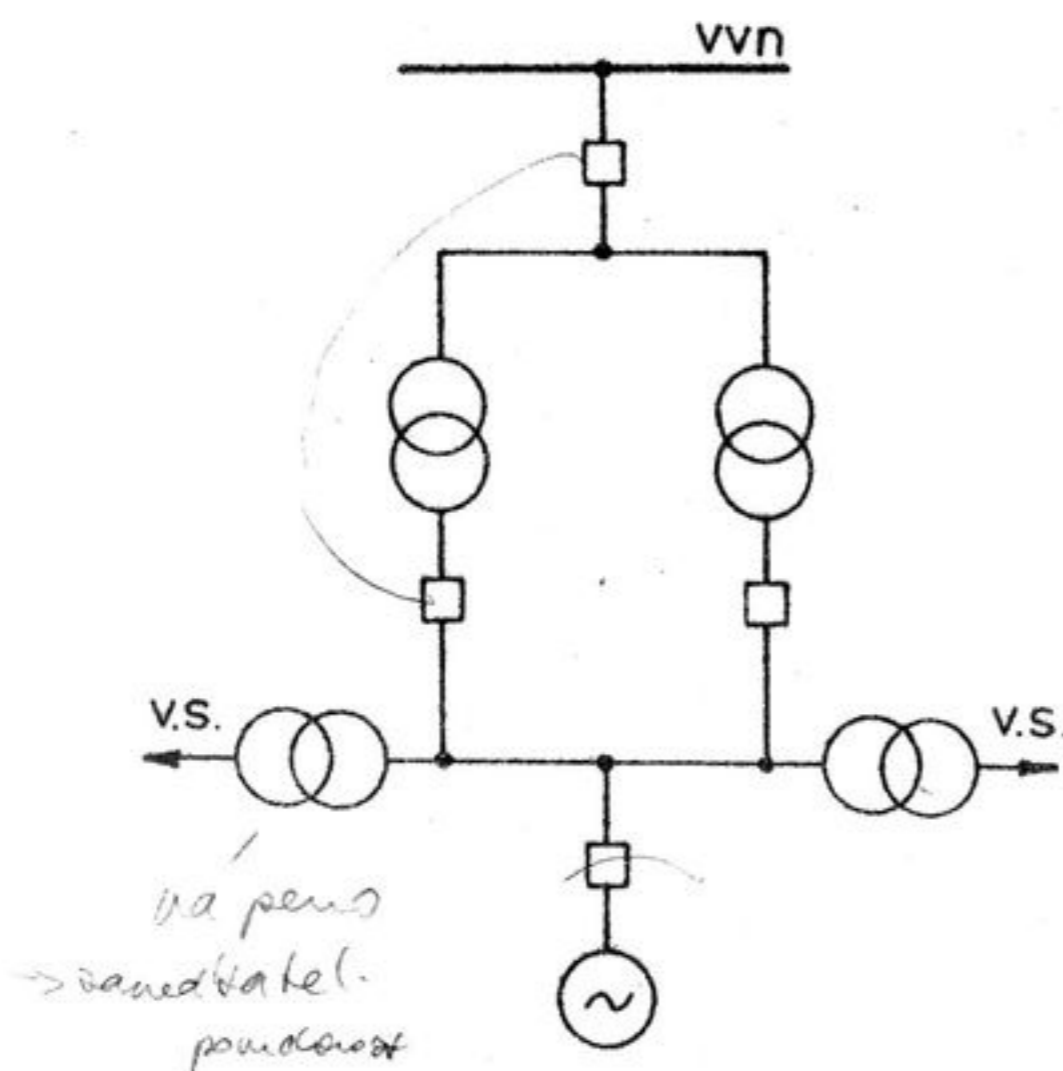
Najíždění i doběh se provádí při napájení vlastní spotřeby ze soustavy. Výhodou je zabezpečení 50% výkonu vlastní spotřeby při poruše na 1 transformátoru vlastní spotřeby. Při poruše alternátoru nebo systému na straně vvn se vypínači odpojí vadný úsek a napájení vlastní spotřeby pokračuje oběma transformátory vlastní spotřeby.



obr.1.10.

Schema s vypínači na straně vn a vvn

Schéma podle obr. 1.11. znázorňuje provedení s připojením 2 transformátorů vlastní spotřeby na Pevno. V této koncepci se vychází ze zanedbatelné poruchovosti transformátorů vlastní spotřeby.

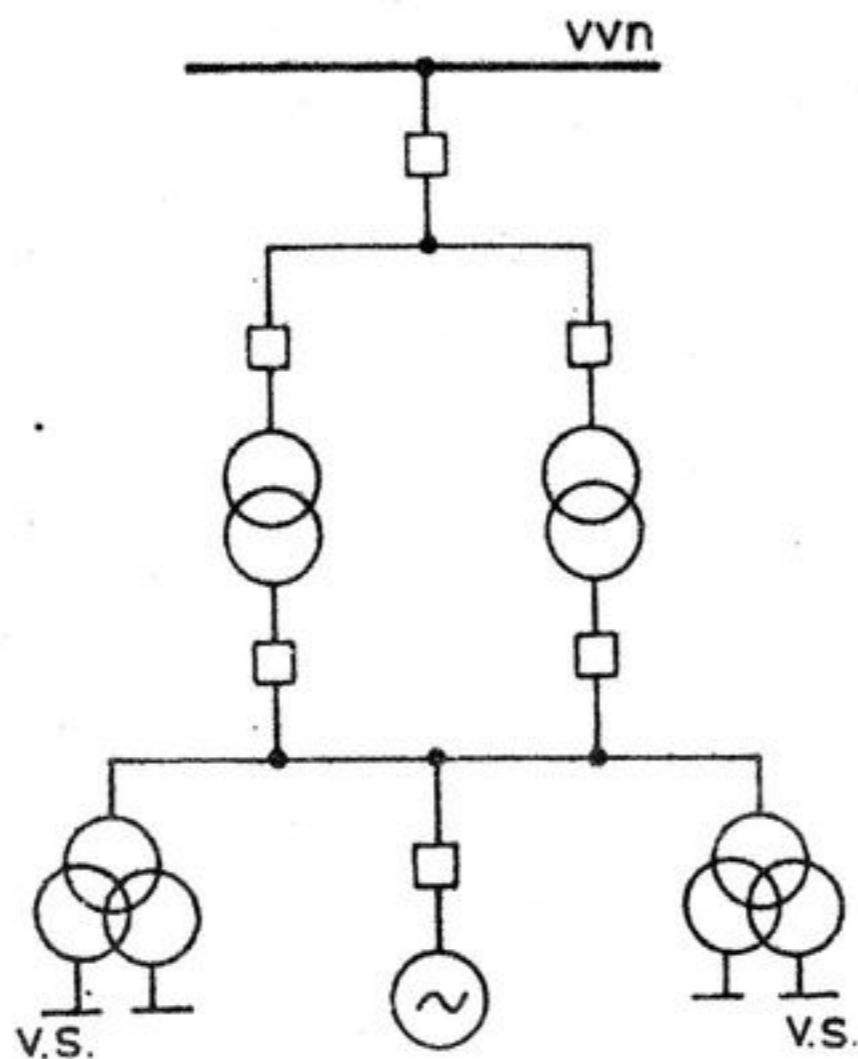


Vypínače jsou pouze na straně vn a není použit najížděcí transformátor. Všechny provozní režimy a většina poruchových stavů je řešena vypínači v oblasti alternátor-blokový transformátor. Jako možný nedostatek tohoto schéma třeba uvést, že při zvlášť nepříznivých zkratech v oblasti blokového transformátoru může vypnout i alternátorový vypínač, takže by bylo nutno přepnout vlastní spotřebu na náhradní zdroj.

obr. 1.11.

Schéma s vypínači na straně vn bez najížděcího transformátoru

Nedostatek předchozího schéma odstraňuje schéma dle obr. 1.12. Na vvn stranu blokových transformátorů jsou zapojeny vypínače jako ve schématu dle obr. 1.10.



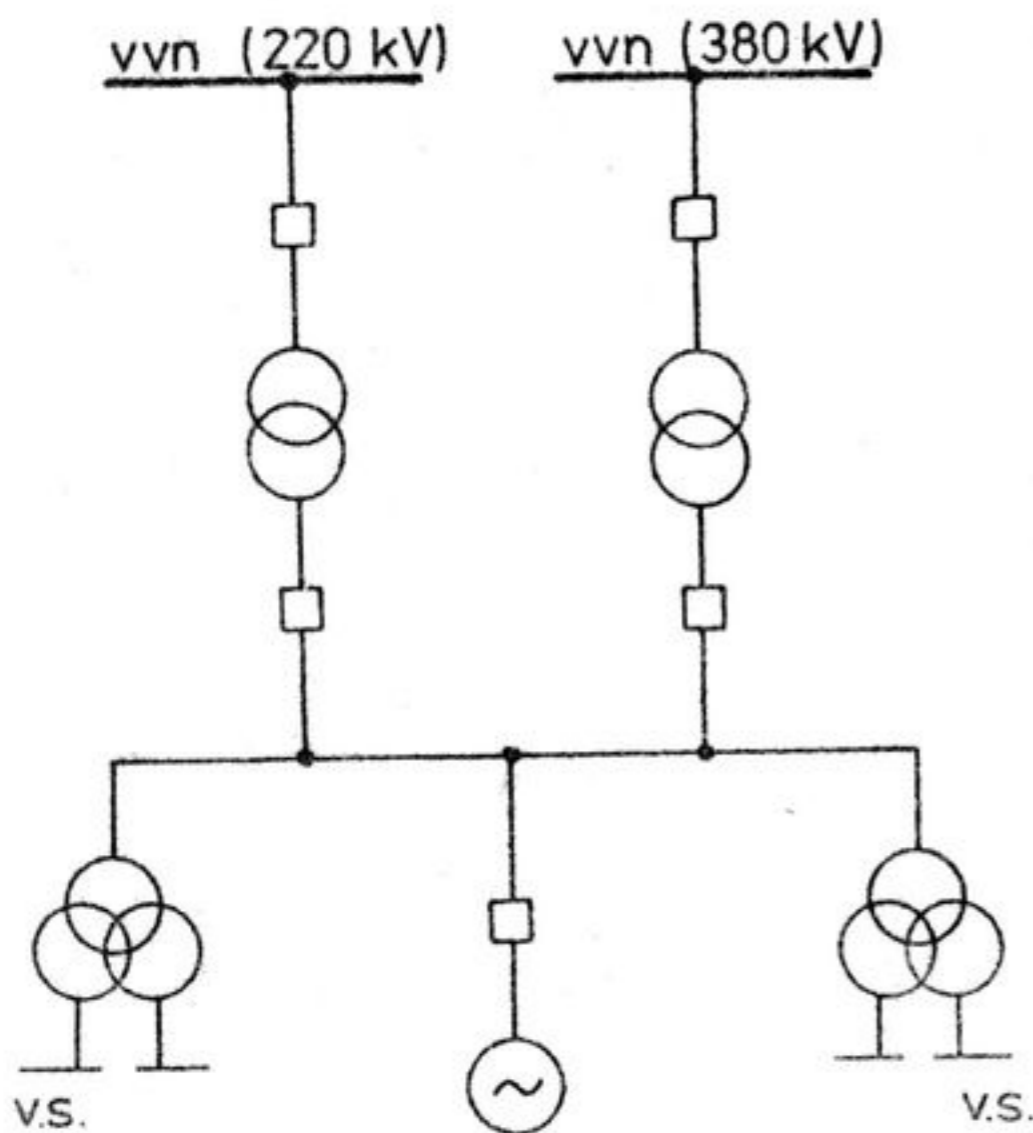
Tím je umožněno napájet transformátory vlastní spotřeby i při odpojení jednoho blokového transformátoru, případně při současně odpojeném alternátoru. Toto schéma, z hlediska počtu vypínačů nejdražší a prostorově nejnáročnější poskytuje vysokou záruku spolehlivosti provozu.

obr. 1.12.

Schéma jaderného bloku s větším počtem vypínačů

Další možnou alternativu zajištění vlastní spotřeby elektrické energie jaderného bloku bez najížděcího transformátoru představuje schéma na obr. 1.13.

V tomto případě je napájení transformátorů vlastní spotřeby zajištěno přes tři alternátorové vypínače a dva napěťově rozdílné systémy vvn. Z realizovaných řešení se toto schéma pokládá za nejspolehlivější. Pokud by se uvažila malá pravděpodobnost, že při zkratu na vedení blízko blokového transformátoru selháním ochran odpojí i alternátor, zůstanou v zapojení podle schéma obr. 1.12. transformátory vlastní spotřeby bez napětí a ve schéma dle obr. 1.13. budou dále napájeny z druhého vedení.



obr. 1.13.

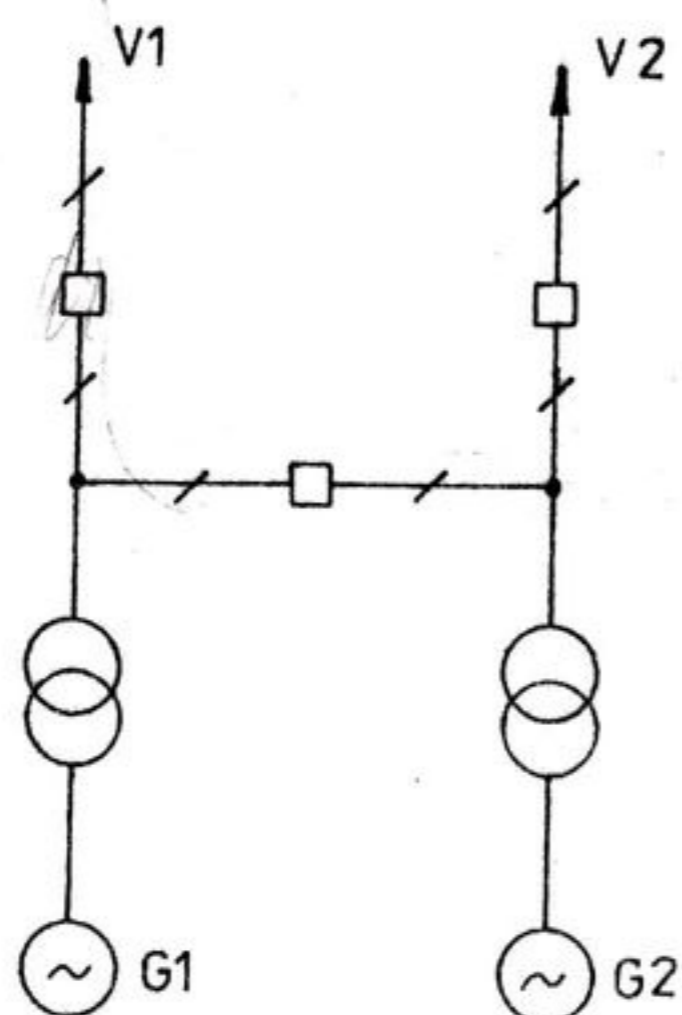
Schéma pro dva napěťově rozdílné systémy vvn

Srovnávacími výpočty spolehlivosti bylo prokázáno, že řešení schémat vlastní spotřeby elektrické energie s alternátorovými vypínači bez najížděcího transformátoru a řešení schémat s najížděcím transformátorem představuje z hlediska spolehlivosti dvě rovnocenné koncepce.

1.2.3. Elektrická schémata vodních elektráren

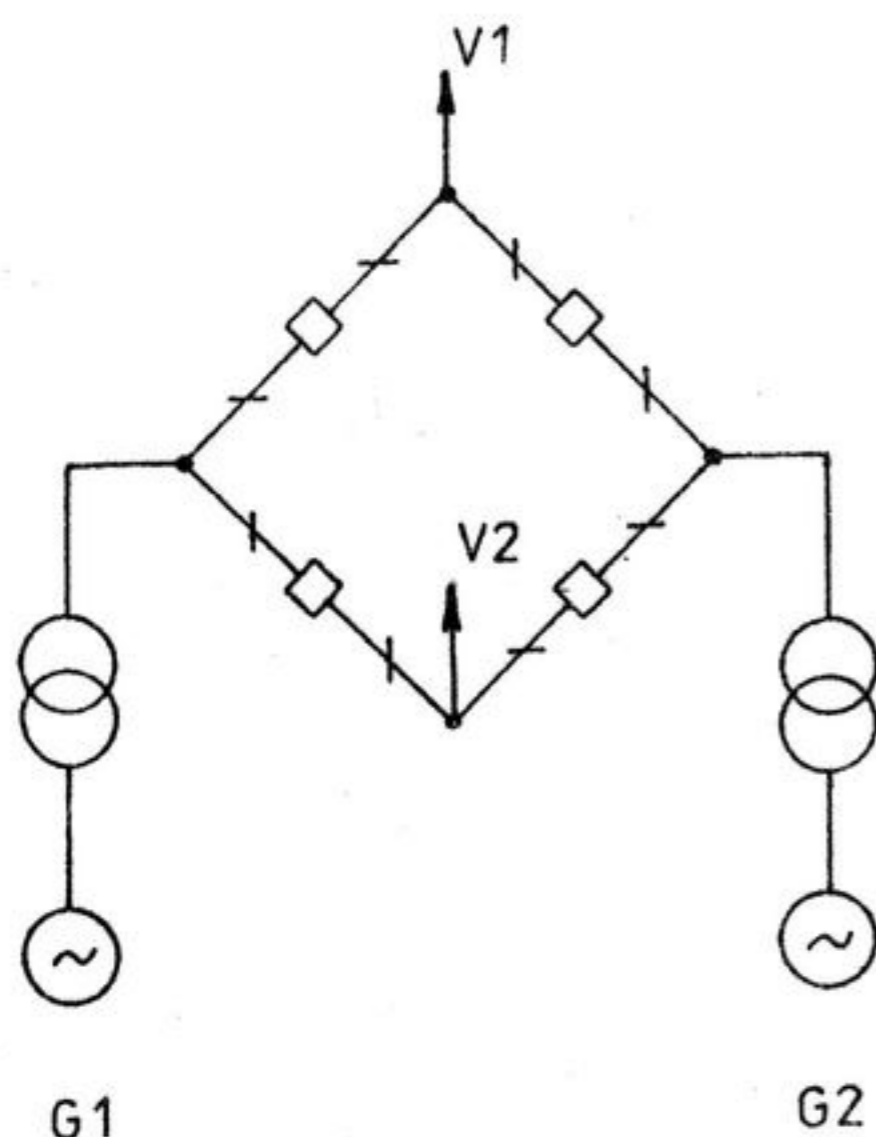
U vodních elektráren, u kterých je vlastní spotřeba elektrické energie obvykle malého výkonu (asi do 1 % z výkonu elektrárny) může se vlastní spotřeba napájet domácím alternátorem, který je na společném hřídeli s hlavním soustrojím. Rovněž bývá používáno zvláštního vodního soustrojí pro vlastní spotřebu, pro které je třeba nalézt napájení vodou při vhodném spědu na turbinu. Rozvodná síť vlastní spotřeby ve vodních elektrárnách je nejčastěji 380/220 V. Záložní napájení a zabezpečení vlastní spotřeby je možné provést zvláštním transformátorem z hlavního nebo jiného napětí elektrárny, ze sítě nebo z jiné blízké elektrárny. Pro vodní elektrárny velkých výkonů se pro napájení vlastní spotřeby nejčastěji používá transformátoru na odbočce vývodu alternátoru.

V některých případech se u vodních elektráren volí schémata bez přípojnic.



obr. 1.14.
Schéma H

Je to zejména v případech, kdy u vodní elektrárny není dostatek místa pro rozvodnu. Jako příklad schématu bez přípojnic lze uvést tzv. schéma H dle obr. 1.14. a čtyřúhelníkové schéma dle obr. 1.15., označované též jako systém s okružní přípojnicí. Schéma H potřebuje pro 2 vývody a 2 zdroje pouze 3 vypínače, což je proti konvenčnímu schématu se dvěma přípojnicemi (5 vypínačů) značná úspora pořizovacích nákladů.



obr. 1.15.
Čtyřúhelníkové schéma

Čtyřúhelníkové schéma vyžaduje 4 vypínače; oba zdroje i vedení možno za provozu libovolně propojovat vypínači bez manipulace odpojovači. Nevýhodou je, že nelze toto schéma rozšiřovat o další bloky či vývody. Velmi často se vyvedení výkonu dvou hydroalternátorů sdružuje do jednoho transformátoru.

1.3. Vlastní spotřeba elektrické energie elektráren

Vlastní spotřeba elektřiny v elektrárnách udává spotřebu elektrické energie při výrobě elektřiny, t.j. v hlavním výrobním zařízení i v pomocných provozech, včetně ztrát v rozvodu vlastní spotřeby. Zahrnuje zejména spotřebu elektrické energie při výrobě páry v parních generátorech (doprava a úprava paliva, doprava vzduchu a spalin, napájení kotlů, úprava napájecí vody aj.) a spotřebu elektrické energie při výrobě elektřiny ve strojovně (úprava vody, čerpání, chlazení aj.). Počítá se od vstupní strany transformátoru vlastní spotřeby nebo od místa, kde je vlastní spotřeba napojena k jiným elektrickým zařízením (např. od odboč-

ky od alternátoru). Do vlastní spotřeby se nezapočítává spotřeba elektrické energie vedlejších provozů a nevýrobních objektů, tyto spotřeby se zahrnují pod odběry elektrárny.

Vlastní spotřeba elektřiny se obvykle udává pro celou elektrárnu a dílčí zařízení jednak v množství elektřiny, jednak v % vyrobené elektrické energie (za den, měsíc, rok). Vlastní spotřeba elektřiny tepelných elektráren se pohybuje v rozsahu asi 4 až 11 %. Pro uhelné elektrárenské bloky je asi 7 až 11 %, při spalování mazutu a plynu asi 5 až 6,5 %, pokud jsou použity výhradně elektrické pohony. Jsou-li použity k pohonu napájecích čerpadel parní turbíny je vlastní spotřeba elektřiny uhelných elektráren asi 4 až 6 %, při spalování mazutu a plynu asi 2,5 až 3,5 %. U tepláren je vlastní spotřeba asi 14 až 18 %. Pro jaderné elektrárny s lehkovodními reaktory je vlastní spotřeba elektřiny 6 až 7 %. U vodních elektráren je vlastní spotřeba obvykle malého výkonu, do 1 % z výkonu elektrárny. V uhelných elektrárnách s velkými jednotkovými výkony bloků, vysokými parametry páry, s rozsáhlou mechanizací pomocných provozů, spalování vysoce popelnatých paliv velikost a význam vlastní spotřeby elektřiny se stále zvyšuje. Vlastní spotřebu elektřiny ovlivňuje více faktorů, které často stojí diametrálně proti sobě.

Jsou to zejména :

- jednotkový výkon bloků a pohonů,
- jakostní znaky spalovaného paliva,
- využití elektrárny,
- provozní režimy,
- měrná spotřeba tepla,
- účinnost pomocného zařízení, dispozice a zařízení elektrárny
- podmínky elektrizační soustavy v daném místě.

Základní schémata vlastní spotřeby elektrické energie v elektrárnách musí být řešena tak, aby byla zajištěna optimálním způsobem vlastní spotřeba při všech provozních stavech. Pro najiždění musí být k dispozici výkon, který v této fázi nemůže ještě dodávat alternátor. Výkon dodává buď najižďecí transformátor nebo může být dodán ze soustavy přes blokový transformátor a transformátor vlastní spotřeby (případně samostatný najižďecí zdroj se spalovací turbínou). Při provozním doběhu je situace obdobná jako při najiždění, pokud se týká zdroje pro vlastní spotřebu. Minimálním požadavkem na vlastní spotřebu při doběhu je zajištění bezporuchového doběhu, bez nebezpečí havárie některého zařízení nebo části elektrárny. Je třeba zaručit, že při odpojení alternátoru od sítě, a to i při takových poruchách, které mají za následek odbuzení alternátoru bude zachováno napájení všech spotřebičů, jejichž výpadek by ohrozil zařízení elektrárny. Jsou to např. zařízení pro dochlazování jaderných elektráren, čerpadla ložiskového oleje a natáčecí zařízení turbosoustrojí, měřicí a řídicí obvody a jiné. Pro úvahu, které poruchové stavy mohou být řešeny poruchovým doběhem je rozhodující velikost blokového výkonu, počet bloků v elektrárně a požadovaný stupeň spolehlivosti.

1.3.1. Vlastní spotřeba kondenzačních elektráren a tepláren

Nejdůležitějším požadavkem na vlastní spotřebu elektráren je zajištění jejího bezpečného a bezporuchového provozu. Technické řešení zajištění vlastní spotřeby elektřiny vždy záviselo na úrovni a provozní spolehlivosti elektrárenského zařízení. Dříve se považovalo za nejvhodnější zajištění použitím samostatných parních pohonů u důležitých strojů. Později se dávala přednost domácím alternátorům poháněným zvláštními turbinami, potom pomocným alternátorům na společné hřídeli s hlavními soustrojími, až se dospělo k nyní nejužívanějšímu napájení vlastní spotřeby transformátory na odbočkách z vývodu hlavních alternátorů, zajištěných od vnější sítě najižďecím (zaskokovým) transformátorem nebo zapojení s alternátorovými výpínači bez a s najižďecím transformátorem.

Bez ohledu na soustavu napájení vlastní spotřeby je třeba dodržet tyto zásady :

- a/ Musí být použity nejméně dva na sobě nezávislé zdroje. Za nezávislé se pokládají dva zdroje, pokud porucha jednoho nezpůsobí poruchu druhého. Napájecí zdroje vlastní spotřeby musí mít zařízení pro samočinné přepínání napájení z jednoho zdroje na druhý (samočinný zások).
- b/ Schéma vlastní spotřeby musí být rozděleno na úseky tak, aby ztráta libovolného úseku (trvalý zkrat apod.) měla za následek odstavení pohonů jen jedné hlavní výrobní jednotky.
- c/ Motory a elektrické spotřebiče vlastní spotřeby rozdělujeme podle důležitosti na tři stupně. Do 1. stupně patří motory důležitých pohonů, u nichž je přerušení provozu spojeno s ohrožením osob, haváriemi zařízení a s vyřazením většího počtu velkých jednotek. Jsou to motory pro napájecí čerpadla kotlů a chladicí čerpadla, zajišťovací pohony aj. Dodávka elektřiny musí být zajištěna nejméně ze dvou nezávislých zdrojů. Přívody k rozvaděčům musí být vybaveny samočinným zapínáním rezervy. Pro zajišťovací pohony a dozorny musí být navrženo takové napájení, aby i při úplné ztrátě napětí v elektrárně či teplárně byl zajištěn bezporuchový doběh. V ČSN 381120 je doporučeno toto napájení : u elektráren (tepláren) s jednotkami do 50 MW stejnosměrným proudem ze staniční baterie, u jednotek 50 MW a větších samočinně startujícím spalovacím soustrojím, popř. kombinovaným se stejnosměrným proudem z baterie.

U motorů pohonů 1. stupně zůstane vypínač pohonu při ztrátě nebo poklesu napětí zapnut, takže po zotavení napětí se soustrojí přímo znovu uvádí do provozu (samočinné spouštění). Kde jsou stykači spínány důležité pohony vlastní spotřeby, je bezpodmínečně nutno zajistit pro případ krátkodobé ztráty napětí nebo poklesu napětí samočinné zpětné zapnutí stykačů, popř. udržení stykačů v zapnutém stavu.

Ve skupině 2. stupně jsou motory pohonů, jejichž přerušení provozu má za následek snížení výroby elektrárny (jsou opatřeny podpěťovou ochranou). Při ztrátě nebo poklesu napětí vypínač vypne a po nařizené době se samočinně znovu zapne (samočinné opětové uvádění do provozu).

Motory a elektrické spotřebiče 3. stupně (přerušení jejich provozu nemá vliv na výrobu energie) bývají opatřeny rychlým nulovým vypínáním a znovu se zapínají ručně nebo samočinně.

Pokud je zdroj vlastní spotřeby dostatečně silný, může být provedeno samočinné spouštění pohonů všech stupňů.

- d/ Správné nastavení elektrických ochranných u zdrojů a motorů ve vlastní spotřebě. Např. při samočinném spouštění je transformátor vlastní spotřeby přechodně zatížen záběrným proudem všech rozbíhajících se motorů. Ochrany musí být seřizeny tak, aby v tomto případě nedošlo k vypnutí. Rovněž ochrany vlastních motorů i napáječů musí být přizpůsobeny samočinnému spouštění.

1.3.2. Vlastní spotřeba jaderných elektráren

Schéma napájení vlastní spotřeby elektrické energie je ovlivněno hlavně použitým typem reaktoru, typem hlavních oběhových čerpadel, počtem instalovaných turboalternátorů na reaktor, technologickým schématem, napojením elektrárny do elektrizační soustavy, počtem blokových transformátorů, potřebným výkonem spotřebičů pro havarijní dochlazování a dalšími vlivy. V souvislosti se současným stavem a perspektivou v ČSSR je další výklad orientován hlavně na jaderné elektrárny s lehkovodními reaktory.

Pro jaderné elektrárny zůstávají v platnosti všechny zásady pro navrhování vyvedení výkonu a rozvodu vlastní spotřeby konvenčních parních elektráren. Jaderná elektrárna má však proti konvenčním tepelným elektrárnám některé specifické zvláštnosti, které jsou především vyvolané provozními stavy reaktoru. V provozu technologické části primárního okruhu jaderné elektrárny je nutno zabezpečit vyvedení výkonu do soustavy tak, aby nedocházelo ke zbytečnému odstavení reaktoru s nepříjemnými následky (xenonová otrava). Kromě toho je počet zásahů havarijní ochrany reaktoru limitován garančními podmínkami paliva a celého primárního okruhu. Charakteristickou zvláštností je vývoj tepla v aktivní zóně po odstavení řetězové štěpné reakce. Toto teplo se vyvíjí dále i po zapůsobení havarijní ochrany reaktoru a při odstavení reaktoru a je důsledkem vlivu zpožděných neutronů a záření α , β , γ štěpných produktů, vzniklých během provozu reaktoru. Reaktor odstavený po zásahu havarijní ochrany tedy vyžaduje poměrně dlouho odvádět asi 5 % tepelného výkonu (hodnota se mění v závislosti na výkonu, se kterým reaktor pracoval a na stupni vyhoření paliva) a je nutné zajistit napájení elektrických spotřebičů, potřebných pro chlazení jeho aktivní zóny i v případě odpojení elektrárny od elektrizační soustavy. V případě roztržení potrubí primárního okruhu, požáru či jiných havarií v jaderné elektrárně je nutné zabezpečit okolí elektrárny před možnými úniky radioaktivních medií.

Specifické zvláštnosti primárního okruhu jaderné elektrárny vyžadují podle důležitosti rozdělení spotřebičů do různých skupin zajištěného napájení. Z hlediska jaderné bezpečnosti musí vyhovět zvláštním požadavkům i kabelové prostory a volba kabelových tras, stínící a těsnící průchodky, protipožární stěny a další části rozvodu.

Pro vysoké nároky na jadernou bezpečnost je koncepce vlastní spotřeby elektrické energie řešena tak, aby pro každý blok byly vytvořeny tři nezávislé systémy spolehlivého napájení (pracovní napájení, záložní napájení a systémy zajištěného napájení).

Vlastní spotřeba elektrické energie se zabezpečí ze sítě vvn přes blokový transformátor a transformátor vlastní spotřeby v odbočce alternátoru. Omezený výkon, nutný pro havarijní dochlazování se při tom zabezpečí z autonomních zdrojů. Pro tento účel jsou obvykle vytvořeny tři nezávislé systémy zajištěného napájení spotřebičů. Každý z těchto systémů je dostatečný pro zabezpečení jaderné bezpečnosti elektrárny ve všech provozních režimech, včetně maximální možné projektové havárie. Nezávislost tří systémů je zajištěna v části elektro jednotlivými zdroji, rozvaděči a kabeláží, ale i v technologii a zařízení systému kontroly řízení samostatnými mechanismy a zařízeními i uspořádáním provozních budov. Kromě tří systémů zajištěného napájení spotřebičů je obvykle pro každý blok realizován ještě čtvrtý systém zajištěného napájení, který zajišťuje napájení důležitých obvodů řízení, včetně zařízení výpočetní techniky.

Pro schéma jaderné elektrárny je charakteristické, že nemá obvykle úsek společné vlastní spotřeby elektrické energie, protože počet neblokovaných spotřebičů je malý a tyto spotřebiče se obvykle rozdělí na jednotlivé blokové sekce vlastní spotřeby.

Rozdělení zajištěného napájení do skupin :

1. skupina - Spotřebiče, připouštějící krátkodobé přerušení napájení či hluboký pokles napětí po dobu maximálně jedna sekunda. Tato doba byla stanovena pro případ, kdy dochází na rozvaděčích tohoto systému k záskoku rezervního napájení. Patří sem zejména hlavní cirkulační čerpadla primárního okruhu, systém řízení a ochrany reaktoru, přístroje měření technologických parametrů reaktoru, pohony olejových čerpadel turboalternátorů a další. Zásadou je omezovat počet a výkon spotřebičů na tomto systému, protože jeho instalovaný výkon je limitován kapacitou baterie, střídači či motorgenerátory.

2. skupina - Spotřebiče, připouštějící přerušeni napájení po dobu maximálně tří minut. Do této skupiny náleží pohony havarijních napájecích čerpadel sekundárního okruhu, čerpadla chladicího mezikruhu hlavních oběhových čerpadel, čerpadla na dodávku kyseliny borité v primárním okruhu, dále systémy biologické a technologické dozimetrie, speciální ventilace, spotřebiče zajišťující odstavení turboalternátoru a další.

3. skupina - Spotřebiče s menšími nároky na spolehlivost napájení. Patří sem všechny ostatní spotřebiče elektrické energie v jaderné elektrárně, které nejsou zahrnuté v první ani druhé skupině.

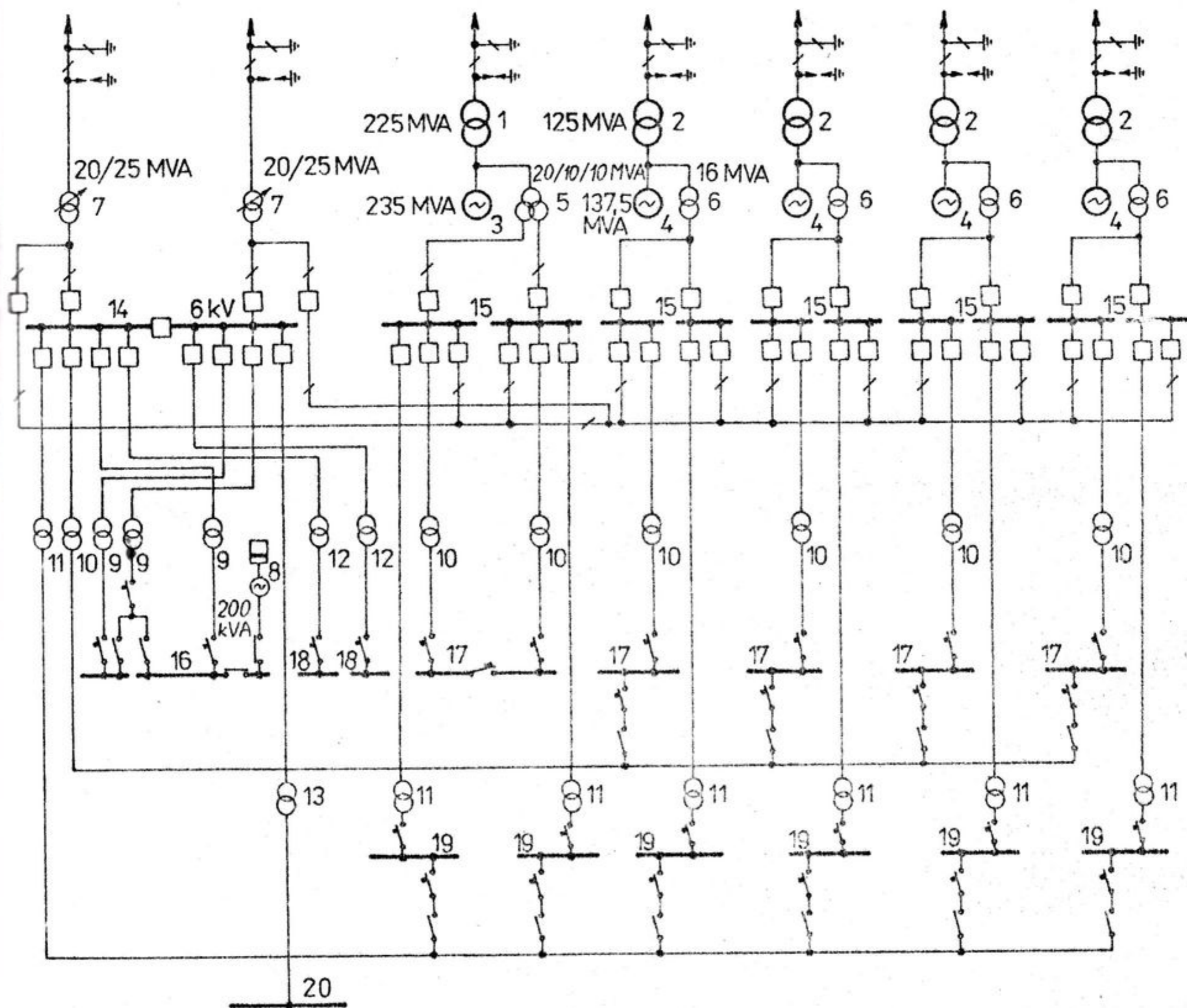
1.3.3. Vlastní spotřeba vodních elektráren

Pro řešení zajištění vlastní spotřeby elektrické energie u vodních elektráren platí prakticky stejné zásady jako pro konvenční kondenzační elektrárny, zejména použití dvou na sobě nezávislých zdrojů, rozdělení na úseky a další.

Elektrické schéma a schéma vlastní spotřeby elektrické energie u přečerpacích vodních elektráren musí splňovat podmínky pro úkoly těchto elektráren ve vyrovnávání denního diagramu zatížení elektrizační soustavy (krytí špičkového zatížení a odběr elektrické energie v době minima), rychlého záložního zdroje pro krytí výpadku v soustavě, pro kompenzaci a regulaci kmitočtu i předávaného výkonu. Musí být přihlédnuto k obvyklé realizaci asynchronního rozběhu alternátor-motoru, elektrického brzdění a dalším požadavkům.

1.3.4. Příklady schémat vlastní spotřeby elektrické energie kondenzačních elektráren a tepláren

V obr. 1.16. je příklad elektrického schéma čs. konvenční kondenzační elektrárny s jedním blokem 200 MW a čtyřmi bloky à 110 MW. Výkon elektrárny je vyveden venkovními vedeními do elektrické stanice 220/110 kV, vzdálené od elektrárny 2 km. Výkon alternátoru 200 MW je vyveden jednoduchým vedením 220 kV a výkony čtyř alternátorů à 110 MW čtyřmi vedeními 110 kV, které jsou uspořádány jako dvě dvojitá vedení. U bloku 200 MW je blokový transformátor 225 MVA složený ze tří jednofázových jednotek à 75 MVA, $242 \pm 5\%$ / 15 kV a u bloků 110 MW jsou blokové transformátory trojfázové o výkonu à 125 MVA, $121 \pm 5\%$ / 13,8 kV. Propojení blokových transformátorů, umístěných před strojovnou a vývody alternátorů je provedeno zapouzdřenými vodiči. Na odbočkách z alternátoru jsou napojeny transformátory pro blokovou vlastní spotřebu elektrické energie. U bloku 200 MW je výkon transformátoru 20/10/10 MVA, $15 \pm 5\%$ / 6,3/6,3 kV a u bloků 110 MW à 16 MVA, $13,8 \pm 5\%$ / 6,3 kV. Pro napájení společné vlastní spotřeby, pro nájždění a odstavení elektrárny, pro zások za transformátory pro blokovou vlastní spotřebu jsou použity dva regulační transformátory 20/25 MVA, $110 \pm 8 \times 2\%$ / 6,3 kV, napojené na síť 110 kV. Při selhání všech zdrojů střídavého napětí nabíhá automaticky trojfázový dieselagregát 200 kVA, 400/231 V.

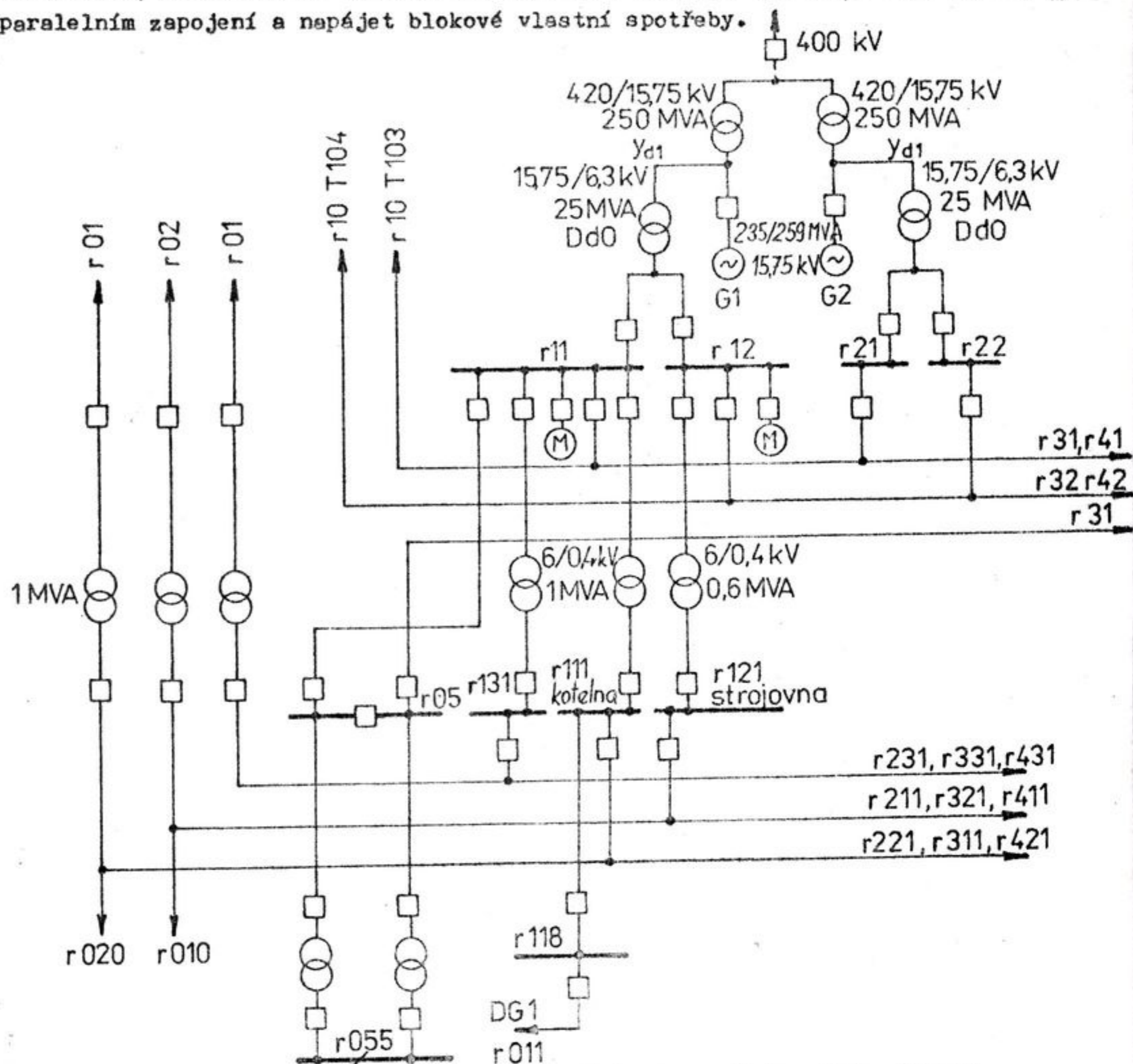


obr. 1.16. Elektrické schéma čs. kondenzační elektrárny

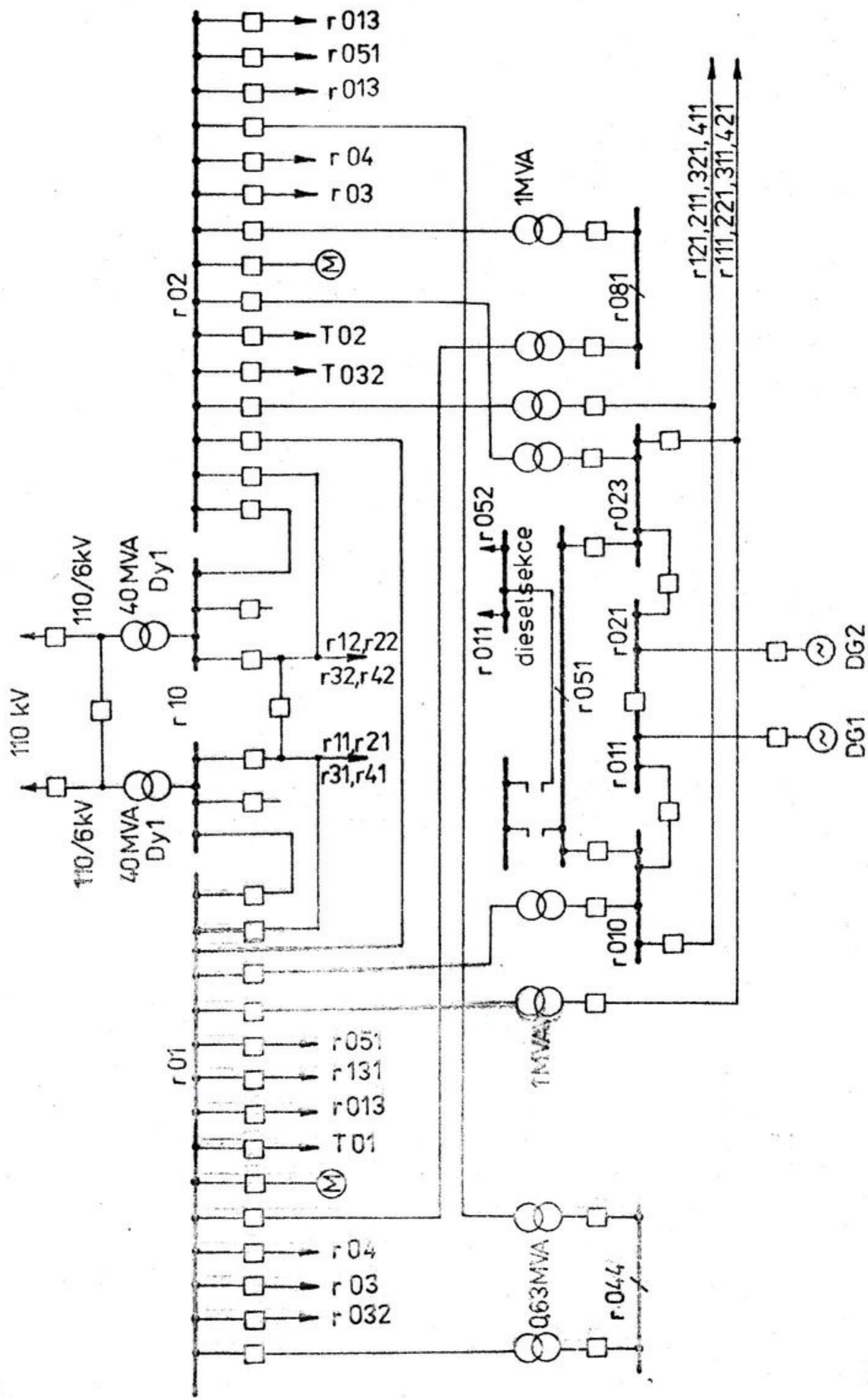
- 1/ Transformátor 225 MVA (3x75 MVA) 242[±]5%/√3/15 kV, Yd 1
- 2/ Transformátor 125 MVA; 121[±] 5%/13,8 kV; Yd 1
- 3/ Alternátor 235 MVA; 200 MW; cos φ 0,85; 15 kV[±] 5%
- 4/ Alternátor 137,5 MVA, 110 MW, cos φ 0,8; 13,8 kV[±] 5%
- 5/ Transformátor 20/10/10 MVA; 15[±] 5%/6,3/6,3 kV; D/d0/d0 pro napájení vlastní spotřeby bloku 200 MW
- 6/ Transformátor 16 MVA; 13,8[±] 5%/6,3; Dd0, dtto 110 MW
- 7/ Transformátor 20/25 MVA, 110[±] 8x2 %/6,3 kV; Yd 1 pro společnou spotřebu, najíždění a zások
- 8/ Dieselalternátor 200 kVA
- 9/ Transformátor 1,25 MVA; 6[±] 5%/0,4/0,231 kV; Dy 1 pro napájení společného rozvaděče nn
- 10/ Transformátor 1 MVA, 6[±] 5%/0,4/0,231 kV; Dy 1 pro blokový rozvaděč nn

- 11/ Transformátor 1, 6 MVA; $6\pm 5\%/0,525$ kV; Yd 1 - pro rozvaděč nn chladicích věží
- 12/ Transformátor 1 MVA; $6\pm 5\%/0,4/0,231$ kV; Dy 1 pro hlavní světelný rozvaděč
- 13/ Transformátor 1 MVA - pro čerpací stanici na složišti popelovin
- 14/ Společný rozvaděč 6 kV
- 15/ Blokový rozvaděč 6 kV
- 16/ Společný rozvaděč nn
- 17/ Blokový rozvaděč nn
- 18/ Hlavní světelný rozvaděč
- 19/ Rozvaděč 500 V v chladicí věži
- 20/ Rozvaděč nn v čerpací stanici na složišti popelovin

V obr. 1.17a) 1.17b) je uveden příklad zjednodušeného schéma blokové a společné vlastní spotřeby konvenční tepelné elektrárny s bloky 200 MW. Vlastní spotřeba je v normálním provozu bloku napájena transformátorem na odbočce z vývodu alternátoru. Použitá koncepce s alternátorovým vypínačem, napájení vlastní spotřeby při najíždění a odstavování je zajišťováno přes blokový a odbočkový transformátor. Transformátory 40 MVA, 110/6 kV plní funkci zásukového zdroje. Výkon dvou bloků je vyveden jedním vývodem do blízké rozvodny 400 kV. V tomto uspořádání, při odpojení dvojbloku (výpadku) síťovým vypínačem musí zůstat oba bloky v paralelním zapojení a napájet blokové vlastní spotřeby.

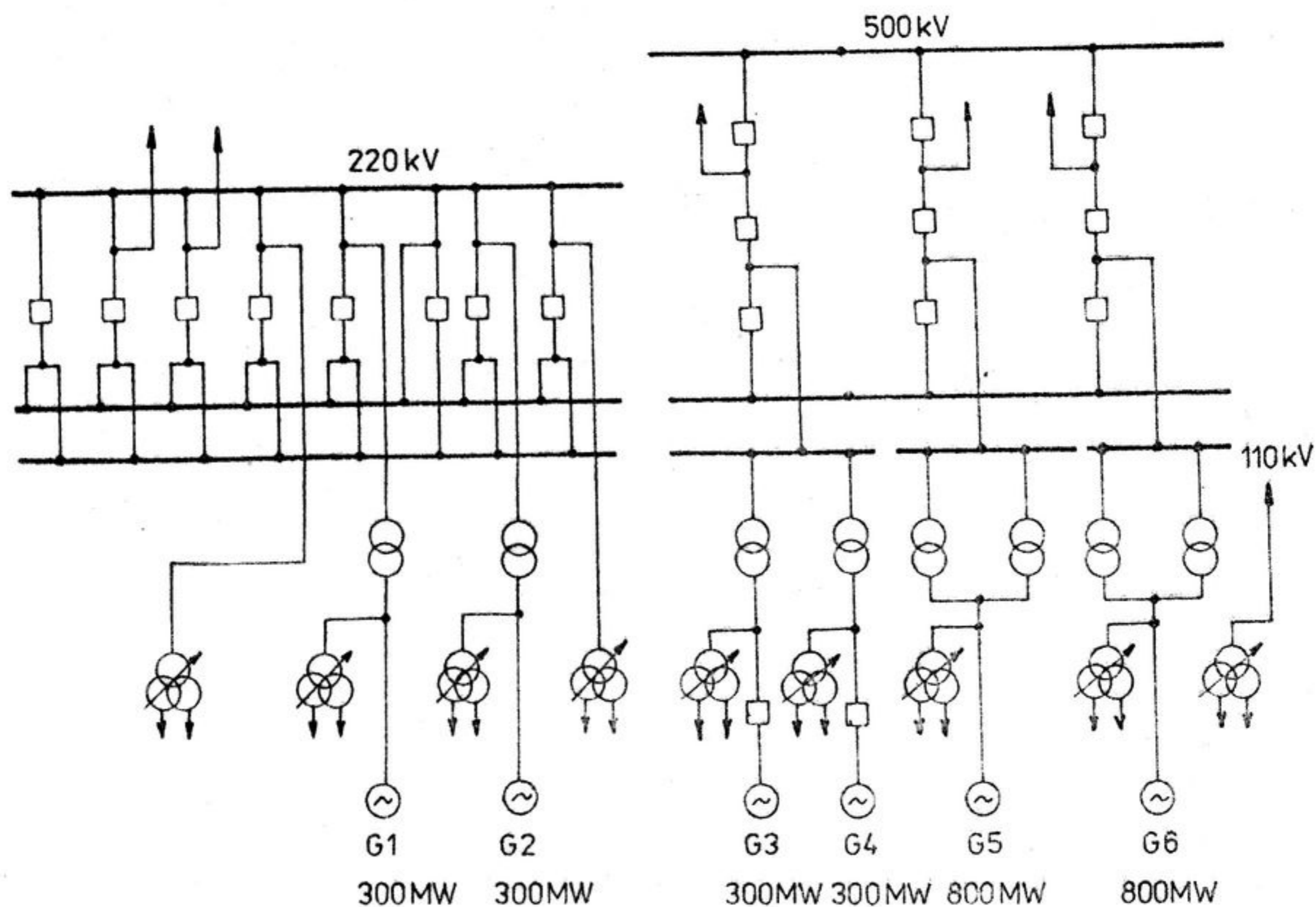


obr.1.17a) Zjednodušené schéma blokové vlastní spotřeby konvenčního bloku 200 MW



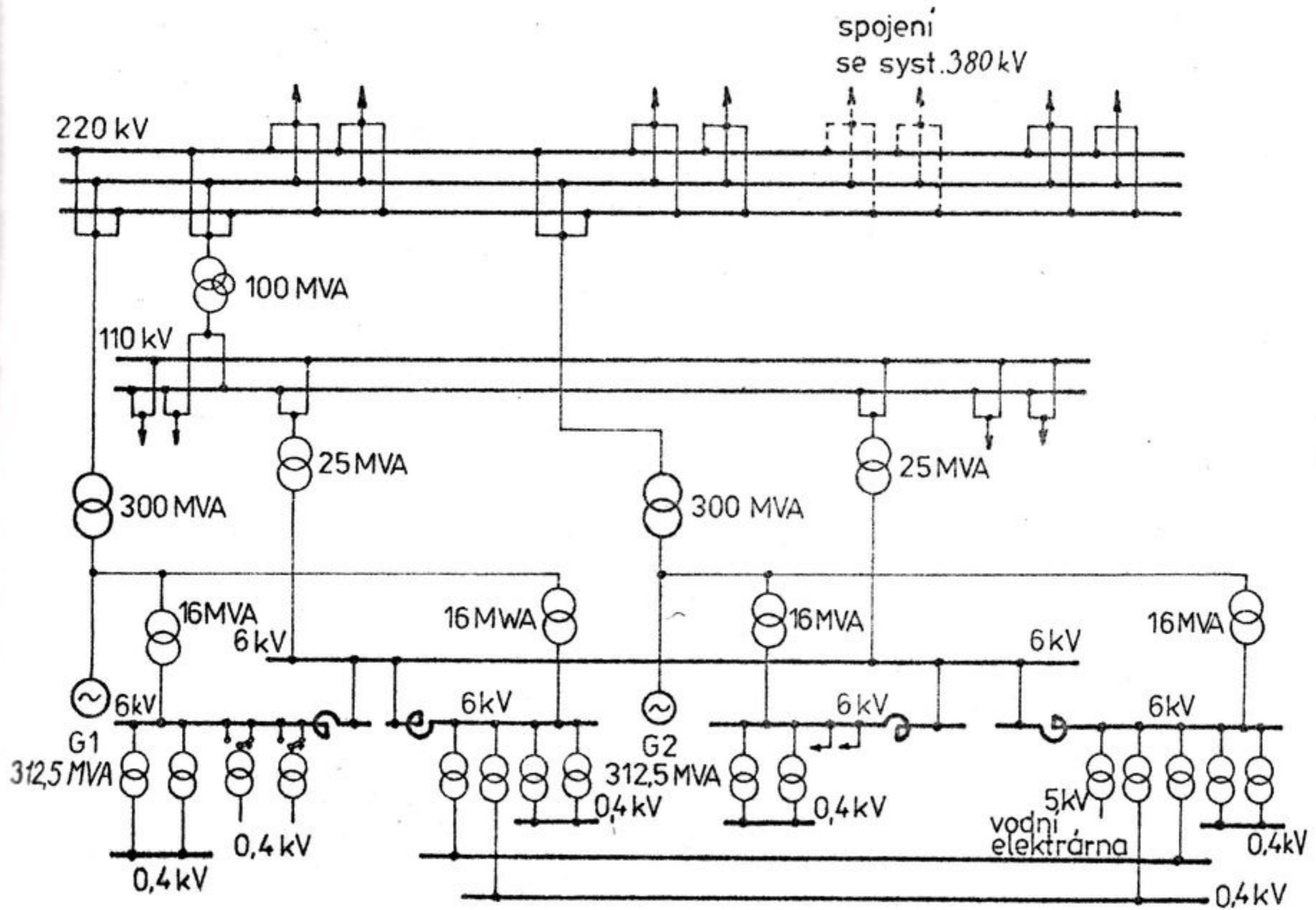
obr. 1.17(b) Zjednodušené schéma společné vlastní spotřeby konvenční elektrárny s bloky 200 MW

V obr. 1.18. je elektrické schéma velké kondenzační elektrárny v SSSR. Vyvedení výkonu alternátorů G1 a G2 je provedeno přes blokové transformátory à 400 MVA na přípojnice 220 kV, G3 a G4 na přípojnice 500 kV. Vlastní spotřeba elektrické energie (6,0,4 kV) je napájena transformátory 32 a 40 MVA na odbočkách z vývodů alternátorů. Výkon z alternátorů 800 MW G5 a G6 je přes dva blokové transformátory o výkonu à 630 MVA předáván do soustavy 500 kV.



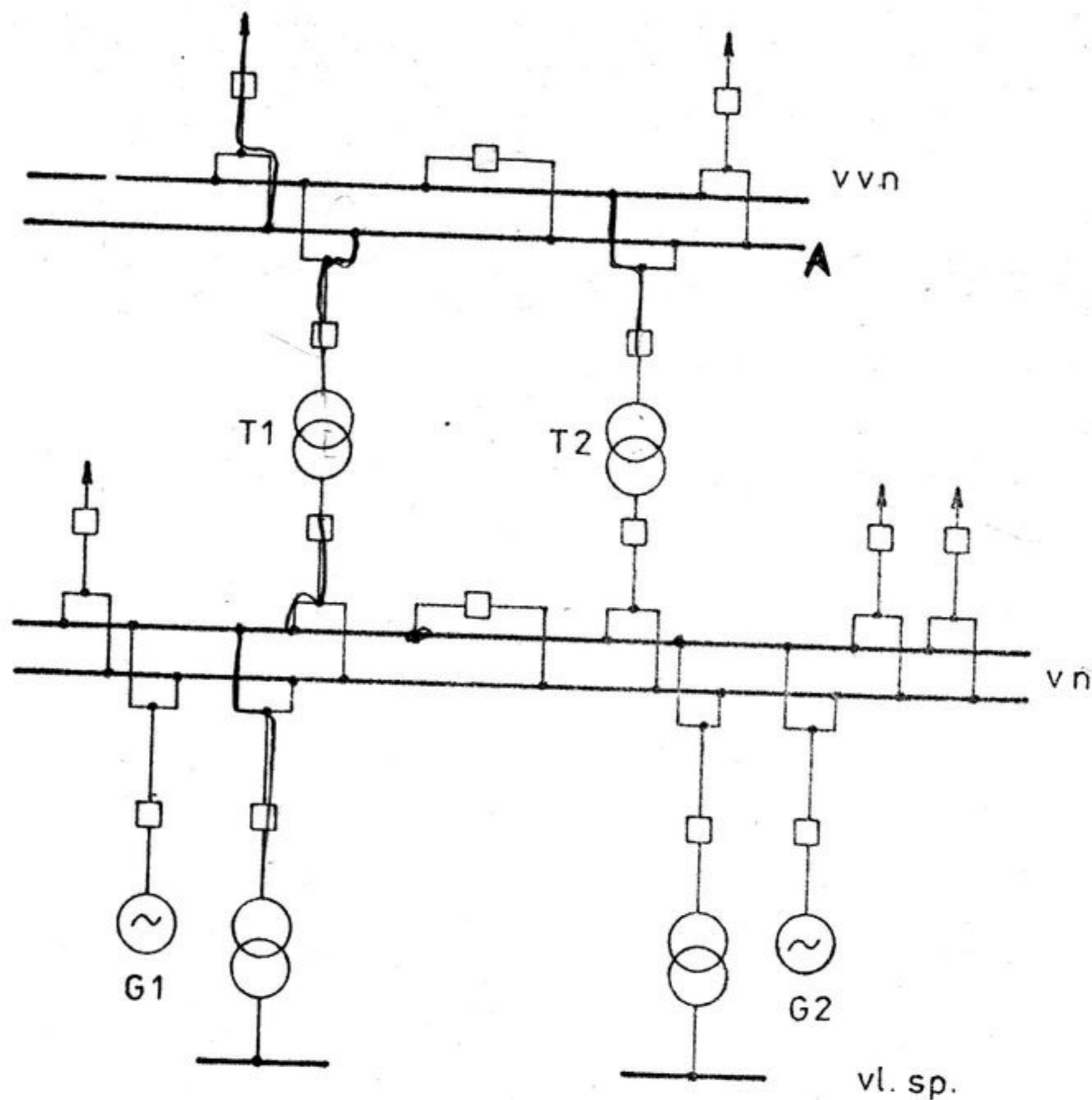
obr. 1.18. Elektrické schéma kondenzační elektrárny v SSSR

V obr. 1.19. je příklad elektrického schéma konvenční kondenzační elektrárny s dvěma duobloky à 260 MW (dva kotle na jedno turbosoustrojí) v NSR. Vlastní spotřeba elektrické energie je u každého duobloku zajišťována dvěma transformátory à 16 MVA, 21/6 kV na odbočkách z vývodů alternátorů. Najížděcí transformátory à 25 MVA, 110/6 kV jsou napojeny na systém 110 kV. Pro vlastní spotřebu obou bloků a společnou vlastní spotřebu je instalováno 14 transformátorů 6/0,4 kV výkonu à 1000 kVA. Na přípojnice 6 kV je přes transformátor 5/6 kV napojena průtočná vodní elektrárna.



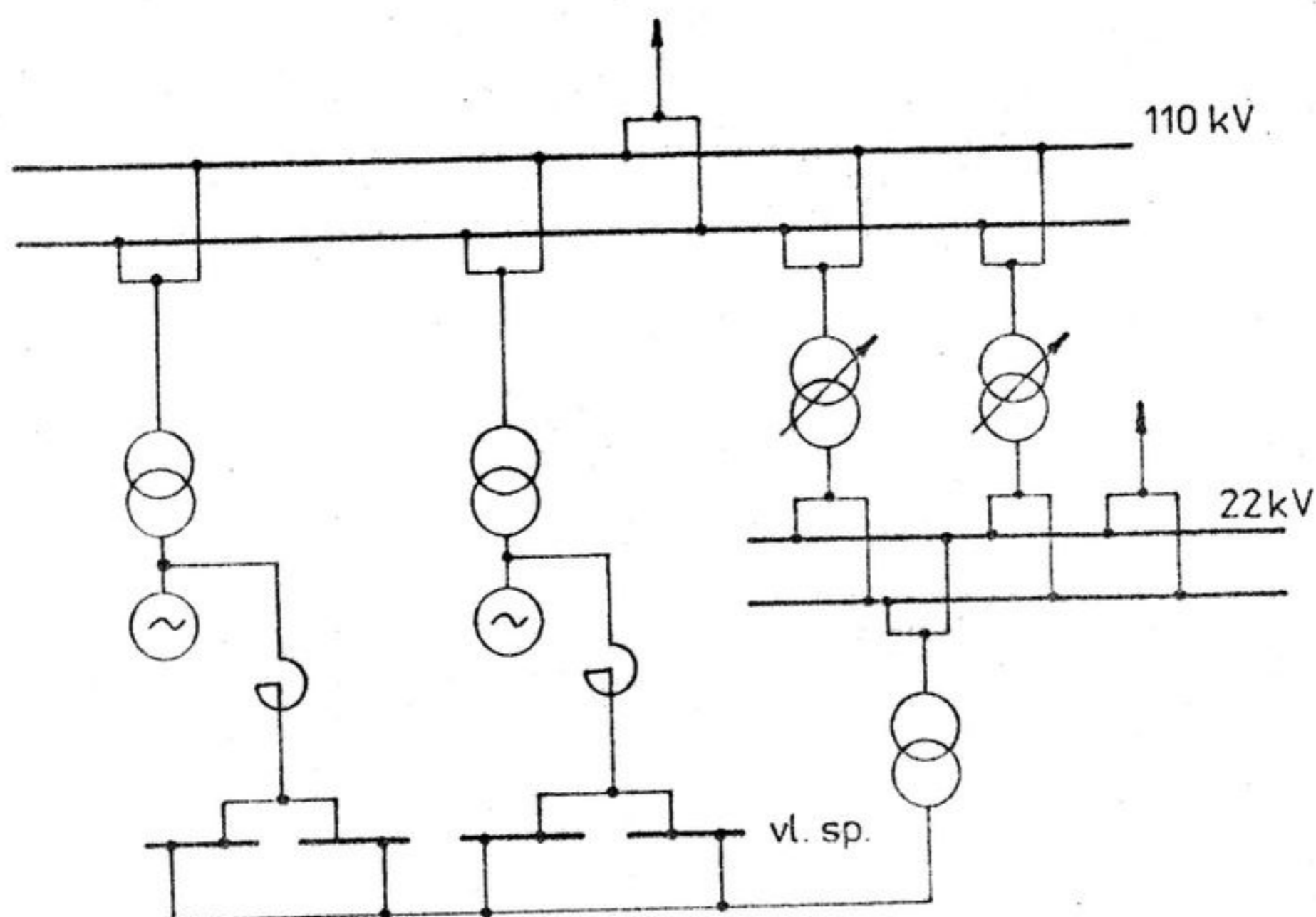
obr. 1.19. Elektrické schéma kondenzační elektrárny v NSR

V obr. 1.20. je uveden typický příklad provedení schéma pro teplárnu a odběrem na alternátorových přípojnicích. Z důvodů situování tepláren obvykle v oblasti větších měst, velký místní odběr vyžaduje vybudování rozsáhlé rozvodny alternátorového napětí (krytí místní spotřeby energie přímo, bez zbytečné mezipřeměny).



obr.1.20.
Elektrické schéma teplárny

V obr. 1.21. je příklad elektrického schéma větší teplárny. Přípojnice vlastní spotřeby jsou v tomto případě děleny podle počtu kotlů. Najíždění a záloha je zajištěna regulačním transformátorem. Soustavy napětí 22 a 110 kV jsou vázány spojovacími transformátory. V odbočce hlavních alternátorů jsou zařazeny reaktory pro snížení zkratových proudů v rozvodu vlastní spotřeby.



obr. 1.21.

Elektrické schéma větší teplárny

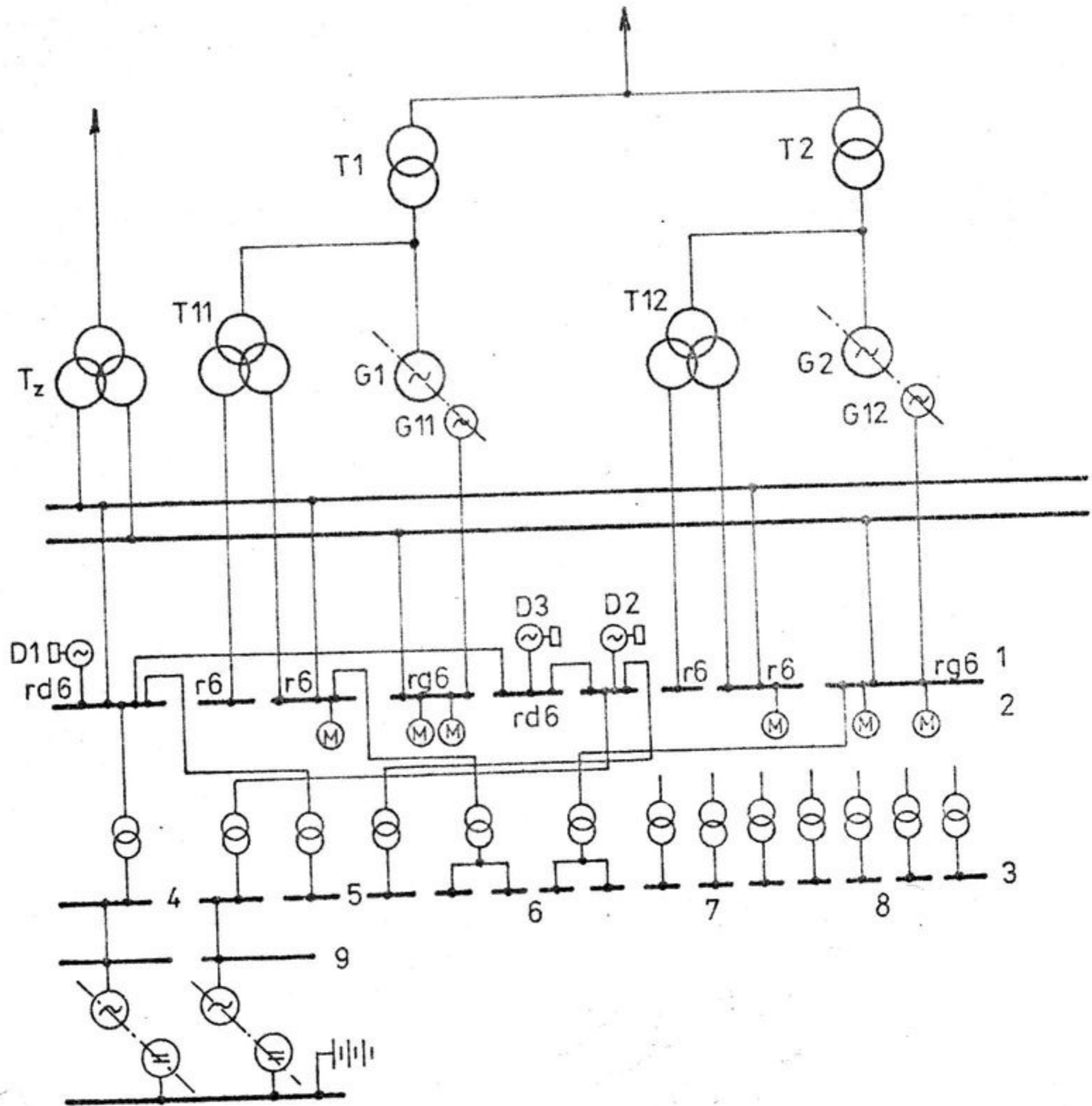
1.3.5. Příklady schémat vlastní spotřeby elektrické energie jaderných elektráren

V obr. 1.22. je zjednodušené schéma vlastní spotřeby elektrické energie bloku jaderné elektrárny typu VVER 440 (V1).

Každý blok má 4 blokové přípojnice 6 kV, 2 přípojnice 6 kV alternátoru vlastní spotřeby a 2 přípojnice zajištěného napájení. Blokové sekce jsou napájeny vždy dvě z dvou odbočkových transformátorů vlastní spotřeby. Blokové přípojnice 6 kV jsou použity pro napájení pohonů, které nejsou potřebné pro havarijní dochlazování. Z těchto sekcí jsou napájeny i dvě hlavní oběhová čerpadla. Sekce 6 kV, napájené alternátory vlastní spotřeby (alternátor 6 MW na společném hřídeli s hlavním turboalternátorem), elektricky nezávislé od elektrizační soustavy jsou určeny pro pohon čtyř hlavních oběhových čerpadel a systému řízení a ochrany. Přípojnice zajištěného napájení (rdě) jsou určeny pro napájení spotřebičů vlastní spotřeby elektrické energie, jejichž provoz je potřebný pro havarijní dochlazování. V normálním provozu jsou tyto přípojnice napájeny z blokových přípojníc odbočkových transformátorů vlastní spotřeby. Při ztrátě napětí na blokových přípojnících jsou přípojnice zajištěného napájení pro spotřebiče 2. skupiny napájeny ze tří dieselalternátorů, každý o výkonu 1600 kW. Kromě toho možno napájet přípojnice 6 kV prostřednictvím záložních přípojníc ze záložního transformátoru Tz, zapojeného na systému vvn elektrizační soustavy. V případě úplné ztráty napětí z elektrizační soustavy je možné při tomto schématu splnit základní požadavek pro havarijní dochlazování reaktoru, t. j. prvých 100s po havarijním odstavení dochlazovat reaktor nucenou cirkulací chladiva hlavními oběhovými čerpadly, napájenými elektrickou energií vyráběnou mechanickým doběhem hlavních alternátorů a alternátorů vlastní spotřeby (využití kinetické energie rotujících hmotností turboalternátorů).

V rozvodu 0,4 kV přípojnice spotřebičů zajištěného napájení 1. skupiny jsou napájeny přes transformátory zajištěného napájení z přípojnic rd6 zajištěného napájení 2. skupiny a při ztrátě napětí v systému vlastní spotřeby z motorgenerátorů napájených z akumulátorových baterií.

Napájení rozvaděčů zajištěného napájení 1. skupiny z rozvaděčů zajištěného napájení 2. skupiny je v normálním provozu zajištěno přes tyristorové přerušovače - bezkontaktní ventilové zařízení, což umožňuje rychlé rozpojení rozvaděčů 1. a 2. skupiny. Při poklesu napětí v síti pro spotřebiče 2. skupiny přechod motorgenerátorů z nabíjecího režimu na režim výroby střídavého napětí je automatický.



obr. 1.22.

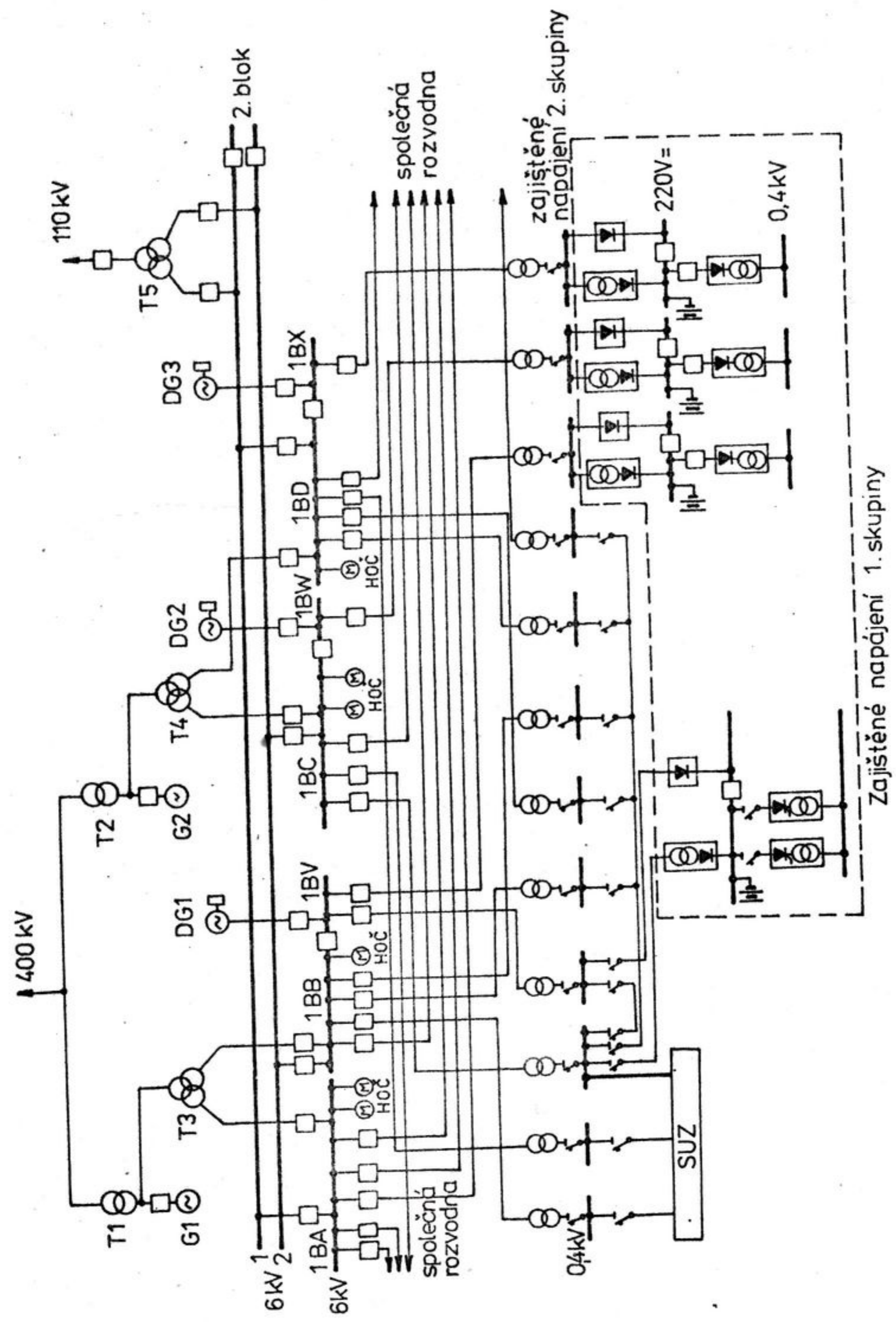
Schema vlastní spotřeby elektrické energie bloku jaderné elektrárny (V1)

Vysvětlivky k obr. 1.22.

- 1 - přípojnice 6 kV
- 2 - motory hlavních oběhových čerpadel
- 3 - přípojnice 0,4 kV
- 4 - přípojnice pro zajištěné napájení
- 5 - blokové přípojnice nn

- 6 - sekce pro elektrické ohřivače
kompenzátoru objemu
- 7 - sekce pro osvětlení
- 8 - sekce napájení společných spotřebičů
- 9 - přípojnice zajištěného napájení

V obr. 1.23. Je elektrické schéma bloku jaderné elektrárny s reaktory VVER 440.



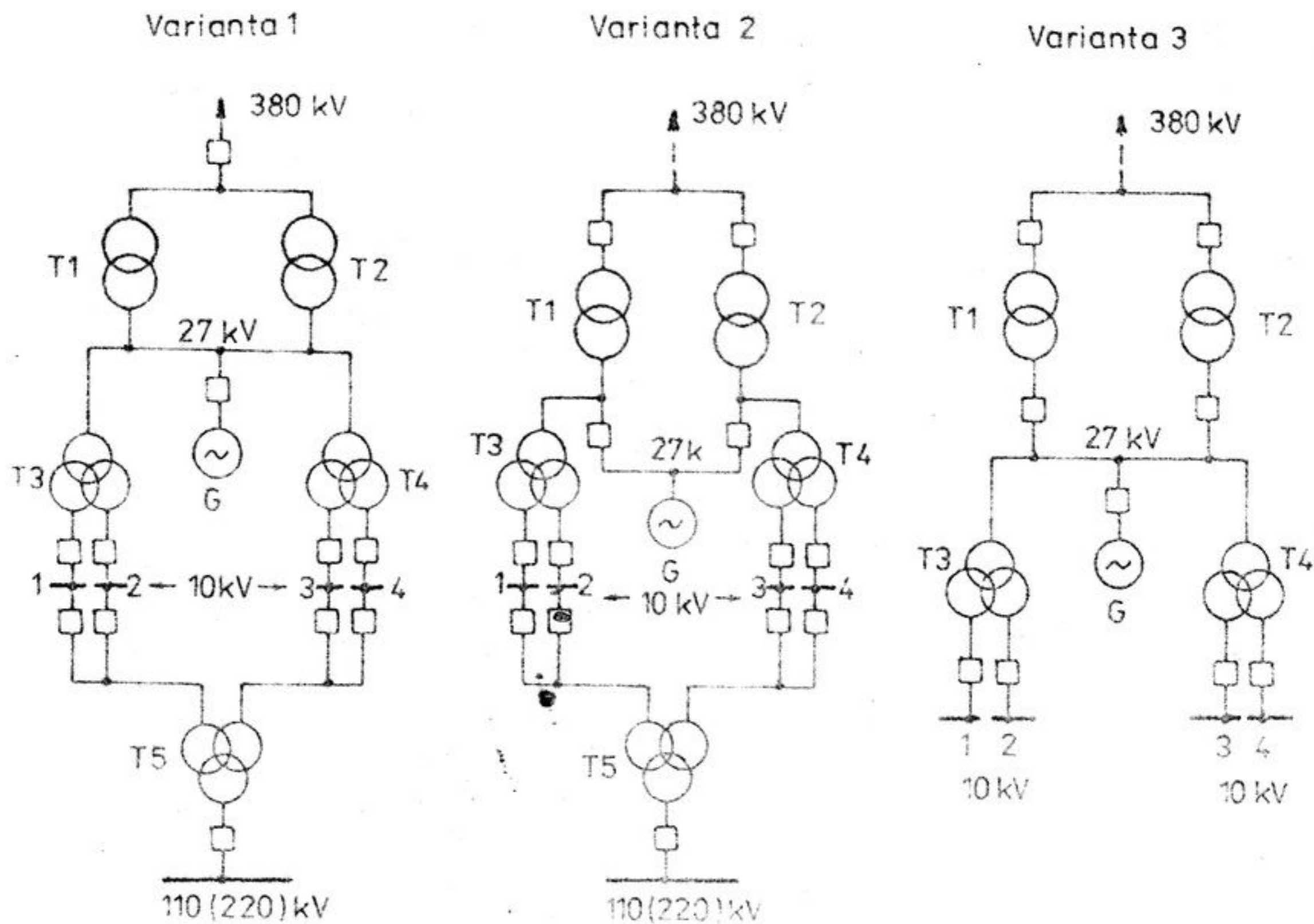
obr. 1.23. Schéma bloku jaderné elektrárny s reaktory VVER 440

Každý ze dvou alternátorů o výkonu 259 MVA s výstupním napětím 15,75 kV pracuje s blokovým transformátorem o výkonu 250 MVA do sítě 400 kV. Vlastní spotřeba bloku 6 kV je napájena z pracovního zdroje tvořeného odbočkovými třívlnovými transformátory o výkonu 32/16/16 MVA. Blokované rozvodny vlastní spotřeby reaktorového bloku sestávají ze čtyř přípojníc 6 kV, z nichž tři jsou děleny na dvě části. Podélné spinače přípojníc 1BB - 1BV, 1BC - 1BW, 1BD - 1BX jsou v normálním provozu sepnuty. Při ztrátě výkonu bloku je možno napájet přípojnice 6 kV buď z vnější sítě 400 kV při vypnutém alternátorovém vypínači přes transformátory T1 - T3, T2 - T4 nebo z vnější sítě 110 kV přes transformátor T5 pomocí přípojníc 1 a 2. Z přípojníc BV, BW, BX jsou napájeny důležité pohony zúčastňující se havarijního odstavení bloku. Z přípojníc, které nejsou napájeny z dieselgenerátorů, jsou napájeny ostatní spotřebiče 6 kV. Hlavní oběhová čerpadla v tomto řešení jsou v provedení s ucpávkami s dostatečným setrvačným momentem, zabezpečující svým doběhem odvod tepla při ztrátě napětí ve vlastní spotřebě. Úsekové rozváděče 0,4 kV jsou napájeny z transformátorů 6/0,4 kV. Pro napájení spotřebičů 0,4 kV druhé skupiny zajištěného napájení jsou pro reaktorový blok instalovány tři rozváděče 0,4 kV. Pro napájení spotřebičů 1. skupiny zajištěného napájení jsou uplatněny tři agregáty nepřerušovaného napájení pro reaktorový blok. Stejnoseměrný systém je navržen s akumulátorovou baterií, trvale dobíjenou řízeným usměrňovačem. Baterie je navržena na dobu 30 minut. Střídavý systém napájení 1. skupiny spotřebičů (0,4 kV) je napájen z akumulátorové baterie trvale přes střídače se sinusovým výstupem. Od systému 2. skupiny spotřebičů je oddělen tyristorovými přerušovači, které systémy oddělí při ztrátě napětí na systému 2. skupiny. Pro napájení 4. systému zajištěného ^{napájení} je instalován jeden agregát nepřerušovaného napájení pro reaktorový blok, sestávající z tyristorových střídačů, tyristorových přerušovačů a řízeného usměrňovače.

Při normálním provozu je vlastní spotřeba 0,4 kV spotřebičů 1. skupiny zajišťována pomocí usměrňovačů a tyristorových střídačů z rozvodu 6 kV přes transformátory 6/0,4 kV. Při ztrátě výkonu bloku a při rozpadu vnějšího systému je vlastní spotřeba pro doběh pokryta z autonomních zdrojů elektrárny. Každý havarijní systém zajištěného napájení má vlastní dieselgenerátor DG1 - DG3, který je udržován pomocnými obvody systému trvale v pohotovosti. Doba náběhu dieselgenerátoru je asi 30 - 35s. Havarijní systémy zajištěného napájení jsou v tomto případě po dobu náběhu dieselgenerátoru napájeny z vlastních akumulátorových baterií.

Jako další příklad je uvedeno řešení elektrických schémat a zajištění vlastní spotřeby elektrické energie pro jaderné elektrárny s lehkovodními reaktory v MSR. Podle provozních zkušeností a požadavku na vlastní spotřebu a záložní elektrická zařízení je pro bloky 1300 MW na základě standardní koncepce a provedení technologické části uplatněno standardní provedení i pro elektrickou část. Zahrnuje zařízení pro zajištění normální vlastní spotřeby, záložní a zajišťovací napájení. Pro čtyři primární smyčky, každá s hlavním oběhovým čerpadlem je zařízení pro vlastní spotřebu elektrické energie rozděleno na čtyři přípojnice s napětím 10 kV. Rovněž systém pro dochlazování je rozdělen do 4 větví odděleného vysokotlakého a nízkotlakého napájení a každé větvi je přiřazen dieselgenerátor. Dalším vývojem bezpečnostní techniky a pro zajištění reaktoru proti extrémním vnějším vlivům (zemětřesení, pád letadla) jsou přiřazeny další nouzová elektrická zařízení pro zajištěné napájení k bezpečnému dochlazení reaktoru, rovněž dělená na čtyři větve.

Vyvedení výkonu jaderných bloků 1300 MW je do soustavy 380 kV. Jelikož elektrárny mají zapojenou zálohu pro vlastní spotřebu elektrické energie v různých místech elektrizační soustavy na jiné hladině vvn (i když elektrárna do této sítě výkon nedodává) nebyla možná jednotná standartizace vyvedení výkonu a byly vypracovány tři varianty. Tyto se odlišují počtem instalovaných alternátorových vypínačů, vypínačů na straně vvn a záložním napojením na síť vvn (obr. 1.24.).

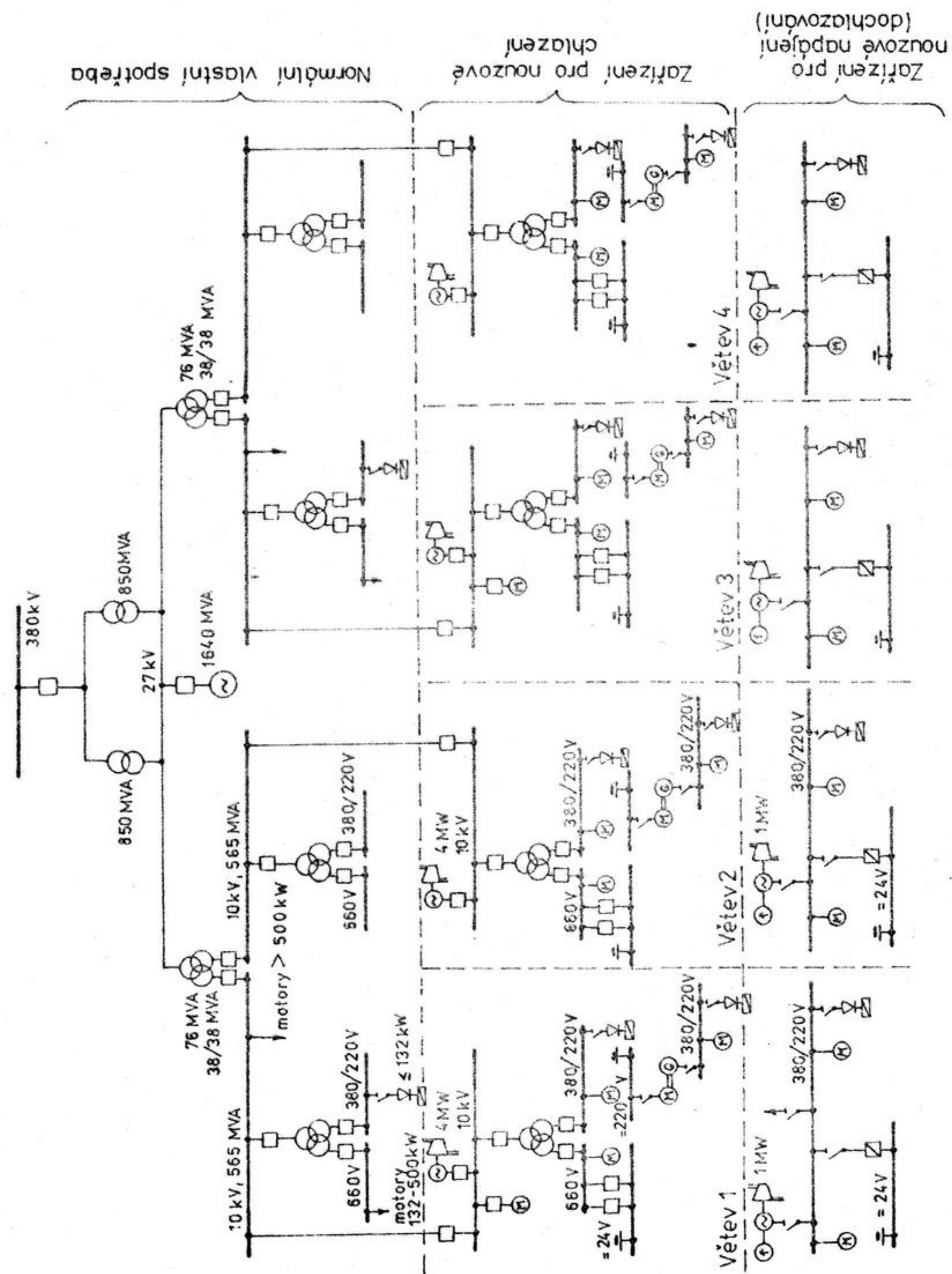


obr. 1.24.

Varianty vyvedení výkonu jaderných bloků 1300 MW

Vlastní spotřeba elektrické energie pro čtyři sekce je napájena dvěma třívinitými transformátory. Dělení je provedeno z důvodů zvládnutí vysokých zkratových výkonů, omezení poklesu napětí při zapínání největších motorů (okolo 13 MW) na asi 20% a použití dostupných spínačů s výkonem okolo 600 MVA. Rozdělení většího počtu hlavních pohonů na různé 10 kV přípojnice umožňuje, že výpadek jedné přípojnice nevede ještě k odpojení bloku, což vede ke zvýšení pohotovosti. Pro rozvodné zařízení jsou standardem určena napětí 220/380 V, 660 V a 10 kV.

Obr. 1.25. znázorňuje funkční rozdělení nouzového napájení. Dělení na větve a zálohování je provedeno u strojních i elektrotechnických systémů.



obr. 1.25. Funkční rozdělení nouzového napájení

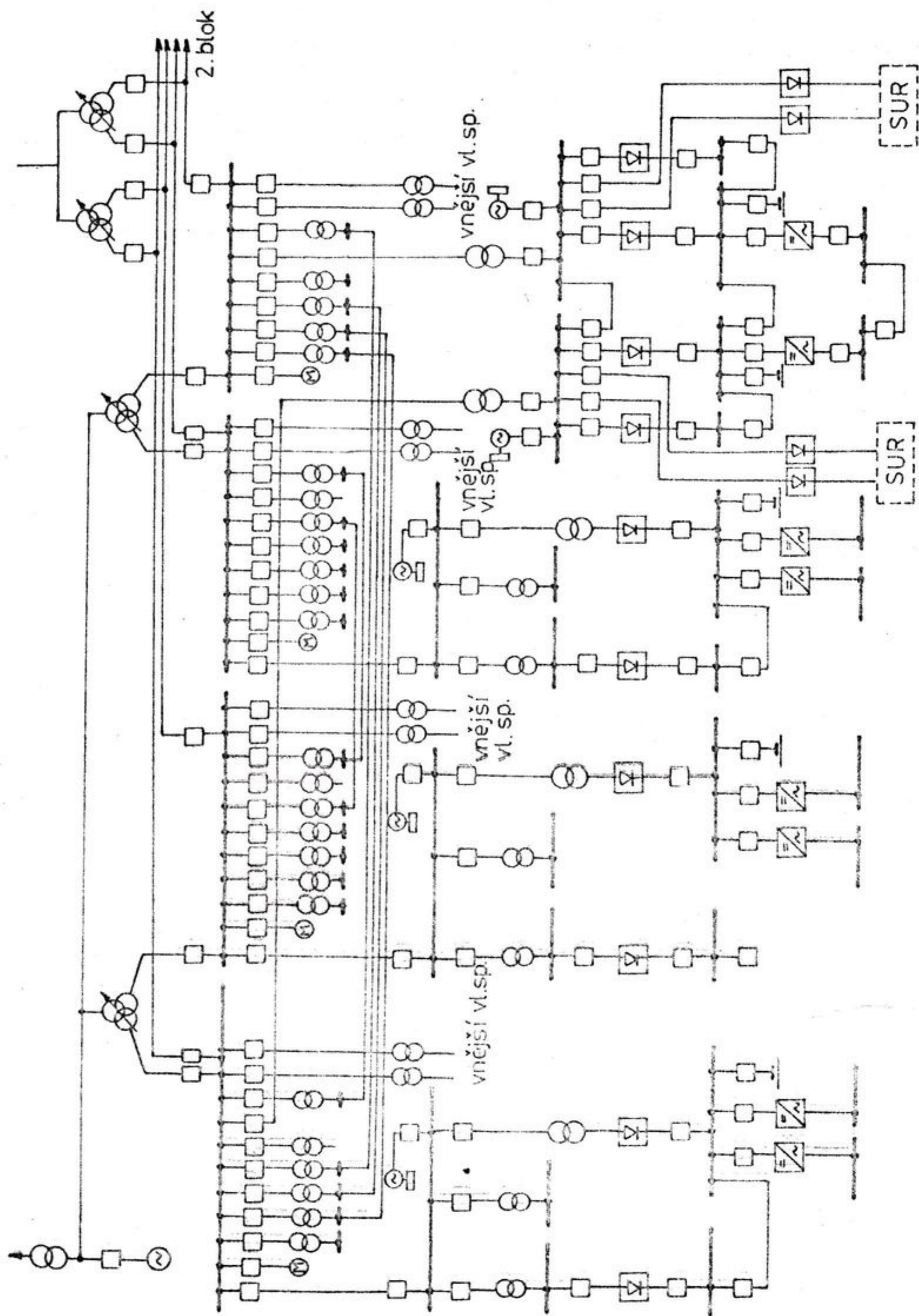
Propojení přípojníc k sousední větvi nebylo použito, protože spolehlivost strojního systému se při vícenásobné možnosti napájení elektrickou energií efektivně ne zlepšuje. Na-proti tomu se spolehlivost zlepšuje elektrickým příčným propojením dělení větví, které rovněž umožňuje přesnou bilanci výkonů nouzových zdrojů, jako dieselgenerátorů, usměrňovačů a akumulátorových baterií. Funkční dělení větví je doplněno korespondujícím prostorovým dělením zálohovaných větví, které znemožňuje mechanické poruchy. Budova reaktoru, rozveden, dieselgenerátorů a budova pro zařízení nouzového napájení jsou rozděleny na čtyři části a rovněž odpovídajícím dělením kabelovými kanály spojeny. Dělicí stěny budov jsou provedeny tak, že místní požár se nemůže rozšířit na sousední redundantní systémy. Zdroji pro nouzové napájení jsou dieselgenerátory, usměrňovače a akumulátorové baterie.

Pro dimensování dieselgenerátorů jsou rozhodující otáčky a poklesy napětí při náběhu velkých asynchronních motorů. Výkon dieselgenerátoru na větev pro dochlazovací systém je okolo 4000 kW. Jsou použity rychloběžné 20 válcové diesellovy motory s 1500 ot/min s velmi dobrými rozběhovými vlastnostmi. Pro nouzové napájení dieselgenerátory jsou stejné hladiny napětí 10 kV, 660 V, 220/380 V jako pro normální napájení vlastní spotřeby.

Pro dieselgenerátory pro nouzové napájecí systémy s výkonem okolo 800 kW na větev je použito napětí 220/380 V. Kromě dieselgenerátorů pro pohony velkých výkonů, které připouštějí přerušení 10s pro start dieselgenerátorů jsou instalovány ještě rozsáhlá zařízení pro stejnosměrný proud, která při výpadku normální vlastní spotřeby bez přerušení dále pracují. Pro zásobování rozsáhlých elektronických systémů celé elektrárny je v budově rozveden a budově nouzového napájení instalováno čtyřnásobné zásobování stejnosměrným proudem 24/48 V. Z vysokého počtu ovládacích, měřících, regulačních a zabezpečovacích zařízení (2500 dálkově ovládaných pohonů, 5500 měřících okruhů analogových a číslicových, 3000 poruchových hlášení, 40 000 dvouhodnotových signálů) vyplývají značné výkony pro usměrňovače (asi 2500 A /větev) a akumulátorové baterie (okolo 3000 Ah/větev).

Zvlášť vysoké požadavky jsou na spolehlivost zásobování elektrickou energií pro zabezpečovací systém reaktoru. Každá zálohovaná skupina systémů ochrany reaktoru je napájena dvěma větvemi 24 V ss zařízení. Dále je instalováno zařízení 220 V ss, které sestává ze čtyř pracovních a prostorově oddělených větví. Z tohoto systému jsou napájena zařízení pro řízení rozveden a ochrany. Větší část výkonu tohoto systému je použita pro pohon měničů.

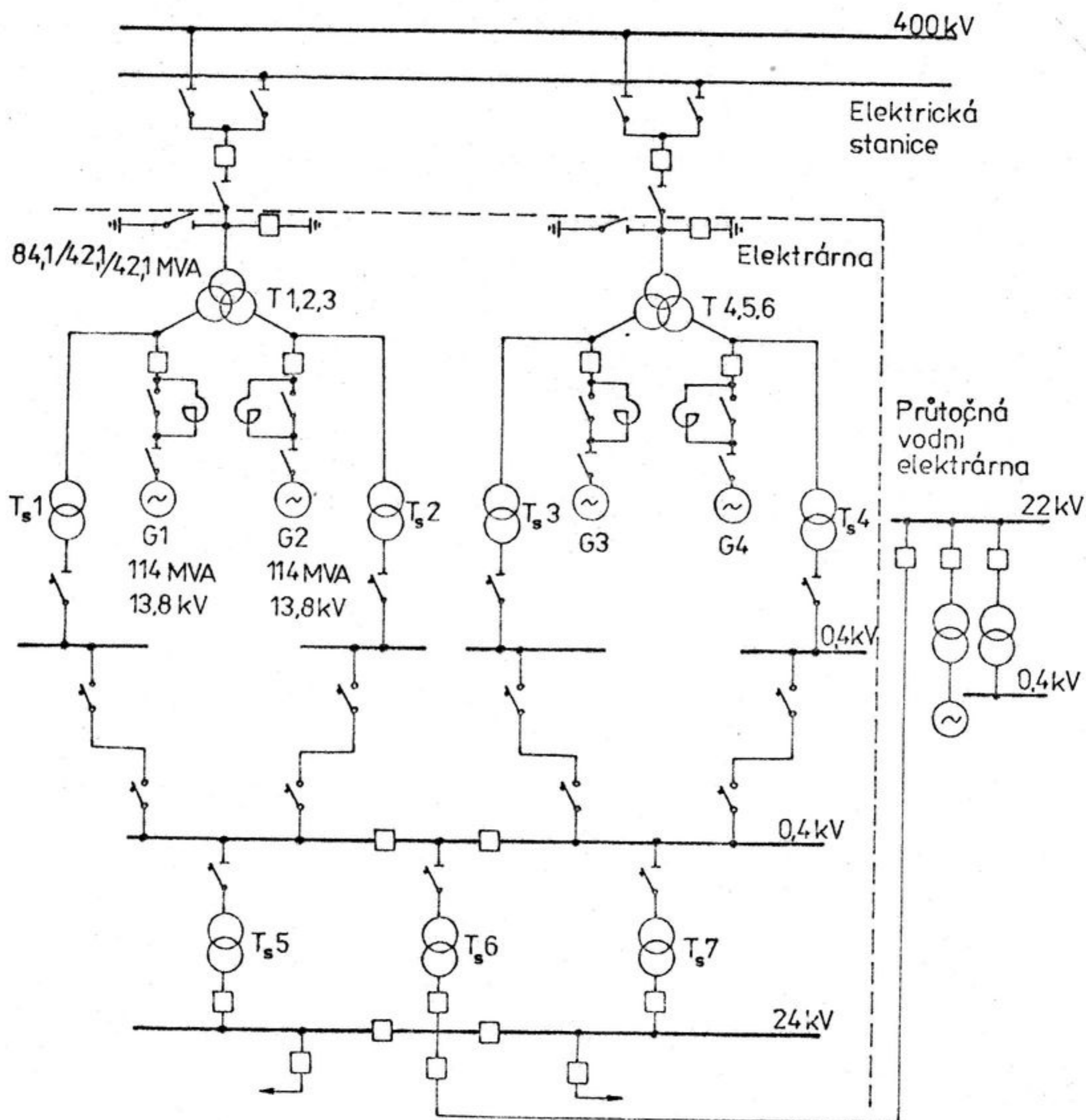
V obr. 1.26. je principiální návrh schéma vlastní spotřeby elektrické energie bloku jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER 1000. Pracovní napájení vlastní spotřeby je zajištěno dvěma transformátory v odbočení přímo z vývodu alternátoru, schéma je řešeno s alternátorovým vypínačem. Najíždění i doběh se předpokládá při napájení vlastní spotřeby ze soustavy přes blokový transformátor, záloha dvěma transformátory ze soustavy vvn. Pro spotřebiče 2.skupiny jsou nouzovým zdrojem napájení dieselgenerátory. Vydělené přípojnice 6 kV při napájení z dieselgenerátorů napájí distribuční transformátory 6/0,4 kV a úsekové rozvaděče zajištěného napájení 2. skupiny. Nejdůležitější spotřebiče jsou napájeny systémem 1. skupiny zajištěného napájení, který tvoří stejnosměrný systém s akumulátorovými bateriemi, dobíjenými řízenými usměrňovači (baterie navrhovány na dobu 30 minut.) Střídavý systém napájení spotřebičů 1. skupiny (0,4 kV) je napájen z akumulátorových baterií trvale přes střídače. Další nezávislý systém zajištěného napájení je vytvořen pro systém ochrany a řízení.



obr. 1.26. Návrh schéma vlastní spotřeby bloku s reaktorem typu VVER 1000

1.3.6. Příklady elektrických schémat vodních elektráren

V obr. 1.27. je příklad elektrického schéma přečerpávací vodní elektrárny se 4mi soustrojími à 105 MW, v provedení dvoustrojovém (motorgenerátor, vertikální reversní turbina - čerpadlo typu Francis).



obr. 1.27.

Elektrické schéma přečerpávací vodní elektrárny v dvoustrojovém provedení

Dva alternátory pracují do společného transformátoru a jednoho pole rozvodny 400 kV, takže dvojice synchronních strojů G1, G2 a G3, G4 tvoří výrobní bloky se třemi jednofázovými transformátorovými jednotkami T1 až T3 a T4 až T6. Pro omezení zkratových proudů na straně 13,8 kV má blokový transformátor 2 sekundární vinutí 13,8 kV s velkou reaktancí mezi nimi. Na straně 400 kV je elektrická energie od transformátorů vyvedena dvěma vedeními do rozvodny 400 kV. V rozvodně je vedení připojeno přes dva vypínače na přípojnice. U transformátorů v elektrárně jsou umístěny pouze uzemňovače 400 kV a bleskojistky.

Napájecím napětím pro vlastní spotřebu elektrické energie je 400/231 V; jeho základním

zdrojem je transformátor v odbočce z vývodu alternátoru. Každý důležitý rozvaděč a spotřebič je zajišťován vždy ze dvou vzájemně nezávislých zdrojů.

Ve schématu dle obr. 1.27. zabezpečují vlastní spotřebu v provozu i mimo provoz tedy tyto zdroje :

- systém 400 kV přes blokové transformátory T1 až T6 a transformátory Ts1 až Ts4,
- průtočná vodní elektrárna,
- dva vzájemně nezávislé systémy distribuční sítě 22 kV přes transformátory Ts5 až Ts7.

Pro provoz čerpání vody do horní nádrže je realizován asynchronní rozběh generátor-motoru. Funkci rozběhového a současně i tlumícího vinutí zastávají elektricky vodivé tyče umístěné v drážkách pólových nástavců, spojené v čelech nakrátko pomocí měděných segmentů a pružných měděných spojek. Generátor-motor se rozbíhá při napětí sníženém pomocí reaktoru. Pro brzdění je použito kombinovaného způsobu. V počáteční fázi se soustrojí brzdí pouze ztrátami vznikajícími otáčením oběžného kola turbíny ve vodě. Při poklesu asi na $0,85 n_n$ se zapíná brzdění elektrické, jehož moment je vyvolán ztrátami, způsobenými proudem $1,3 I_n$ v nakrátko spojeném vinutí statoru.

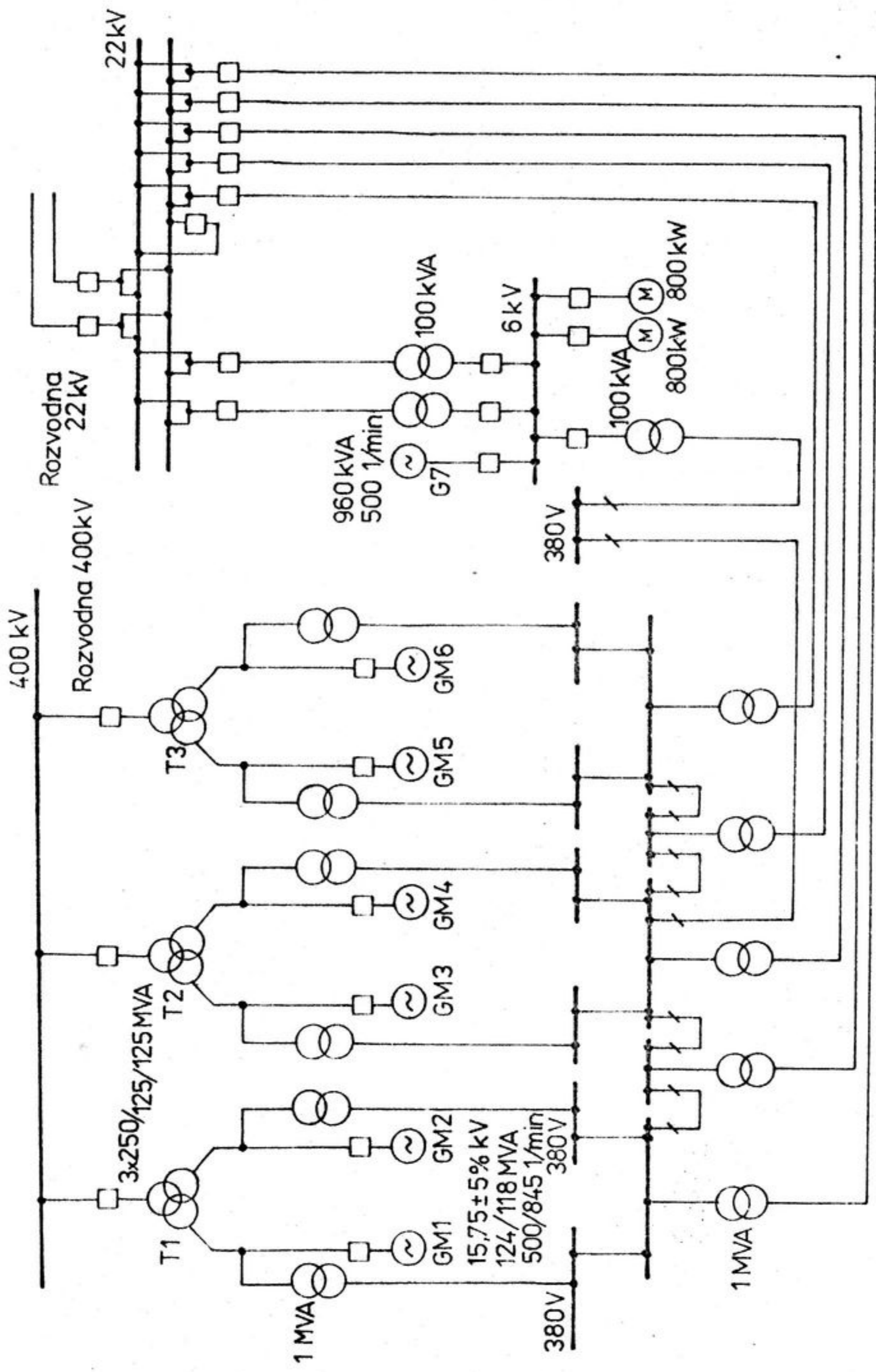
V obr. 1.28. je znázorněno realizované elektrické schéma přečerpávací vodní elektrárny se šesti soustrojími GM1 až GM6 v třístrojovém provedení. Soustrojí, tvořené motorgenerátorem, turbínou, čerpadlem má v elektročásti tyto technické parametry :

| | | alternátor | motor |
|---------------------------|---------|------------|---------|
| zdánlivý výkon | [MVA] | 124 | 118 |
| cos φ | [-] | 0,9 | 0,96 |
| jmenovité napětí | [kV] | 15,75 | 15 |
| kmitočet | [Hz] | | 50 |
| jmenovitý proud | [A] | | 4545 |
| jmenovité/průběžné otáčky | [1/min] | | 500/867 |

Dvojice alternátorů pracují přes dvojblokové transformátory do rozvodny 400 kV. Transformátory dvojbloků jsou v jednofázovém provedení. Z rozvodny 400 kV je výkon vyveden jednou linkou 400 kV, v budoucnu bude doplněna ještě jedna linka 400 kV.

Vlastní spotřeba je zajišťována přes transformátory 1000 kVA na odbočkách z vývodů alternátorů. Společná vlastní spotřeba elektrárny je zajišťována z rozvodny 22 kV, která je napájena dvěma linkami 22 kV a z malého alternátoru G7.

S rozvodnou 22 kV je tento alternátor propojen přes rozvodnu 6 kV pro první čerpání dvěma transformátory 1000 kVA. Tento alternátor využívá vodní energii trvalého průtoku a je rovněž používán jako záskokový zdroj pro najetí velkých strojů pro případ, že systém 400 kV je bez napětí.



obr. 1.28. Elektrické schéma přečerpávací vodní elektrárny
v třístrojovém provedení

1.4 Zdroje vlastní spotřeby elektrické energie

Spolehlivost napájení pomocných zařízení výrobních bloků elektráren závisí na vhodně zvoleném schématu zapojení vlastní spotřeby elektrické energie. Při návrhu schématu se vychází z volby napájecích zdrojů pro vlastní spotřebu. Zdroje vlastní spotřeby musí vyhovět všem požadavkům provozu elektráren, t.j. umožnit najetí elektrárny z úplného klidu, krytí dodávku elektrické energie pro vlastní spotřebu při normálním provozu a zajistit doběh elektrárny do úplného klidu z normálního, poruchového, resp. havarijního stavu. Podle funkce členíme zdroje vlastní spotřeby elektrické energie na najížděcí zdroje, pracovní zdroje, záložní zdroje a doběhové (autonomní) zdroje.

Najížděcí zdroj vlastní spotřeby umožňuje uvést elektrárnu do chodu z úplného klidu. Normálně se používá jako najížděcího zdroje sítě, vlastní najížděcí zdroj (např. plynové turbíny) lze použít ve zvlášť zdůvodněných případech.

Pracovní zdroj vlastní spotřeby zajišťuje dodávku elektřiny pro vlastní spotřebu při normálním provozu elektrárny.

Záložní zdroj vlastní spotřeby zajišťuje chod elektrárny v případech poruchy nebo oprav na pracovních zdrojích nebo při ztrátě napětí na pracovních přípojnicích.

Doběhový zdroj vlastní spotřeby umožňuje uvést elektrárnu do úplného klidu při normálních i poruchových provozních stavech.

Nejrozšířenějším způsobem napájení vlastní spotřeby elektráren je samostatné napájení každého bloku transformátorem vlastní spotřeby (pracovní zdroj) na odbočce z vývodu alternátoru (obr. 1.3). Najížděcí zdroj (současně plnící funkci záložního a doběhového zdroje) tvoří transformátor, napájený ze sítě. V normálním provozu je vlastní spotřeba jednotlivých bloků napájena odbočkami od příslušných alternátorů přes transformátory T11, T12. V případě poruchového vypnutí pracovního napájení některého bloku převezme napájení postiženého bloku automaticky najížděcí (záložní) transformátor TR. Např. při vypnutí vypínače V1 se automaticky zapnou vypínače V2 a V3, V4 a V5. Velmi často je najížděcí (záložní) transformátor trvale pod napětím.

U velmi velkých bloků, jak uvedeno v části 1.2.1 se v posledních letech uplatňuje koncepce, kde blokový transformátor přejímá část funkcí najížděcího transformátoru (napájení při najíždění a odstavování) a najížděcí transformátor má potom funkci záložního zdroje.

1.4.1 Doběhové zdroje

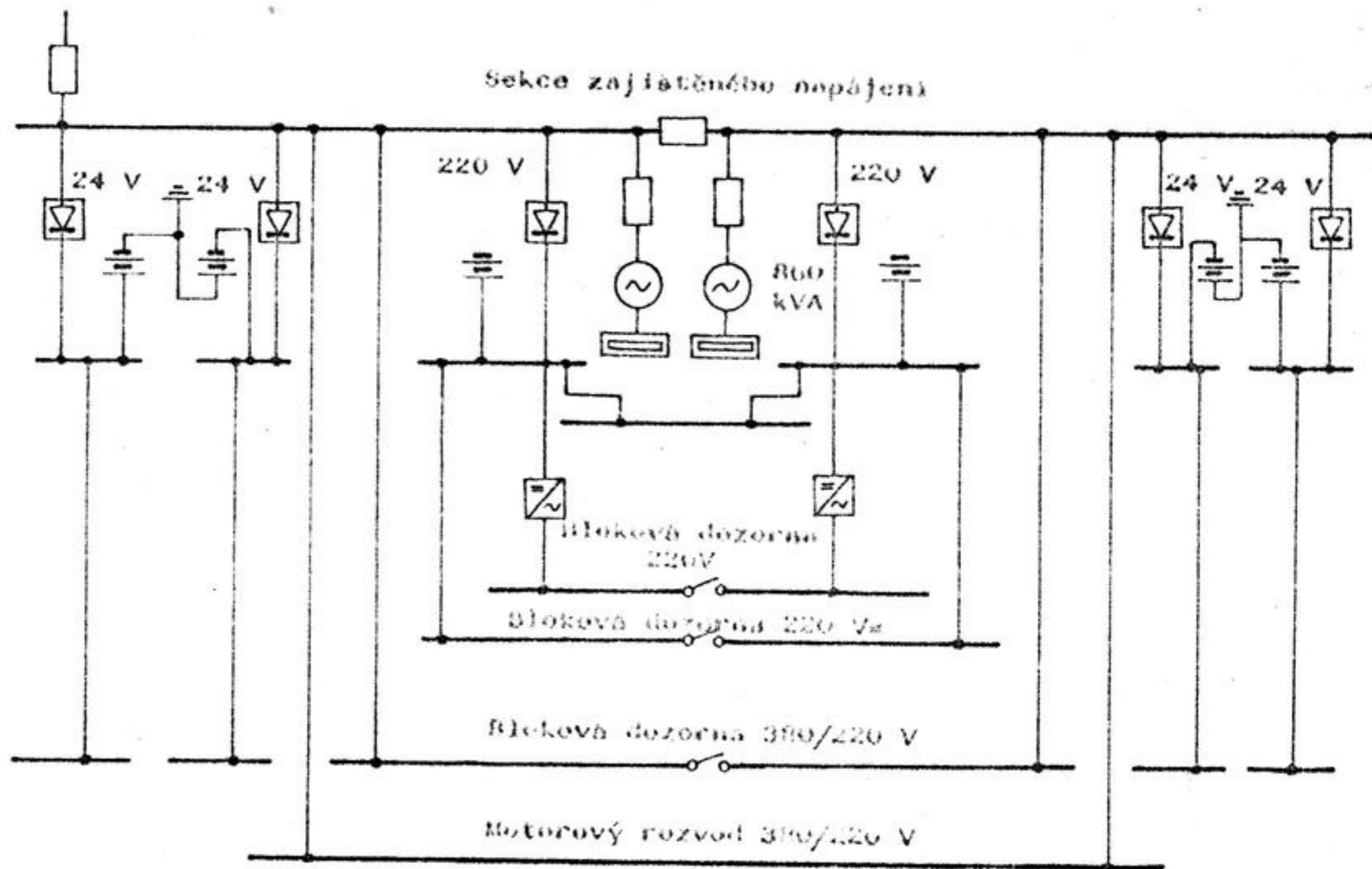
U menších elektrárenských bloků se jako doběhových zdrojů používalo obvykle sítě a akumulátorových baterií pro spotřebiče, jejichž provoz je nutno udržet i při úplné ztrátě střídavého napětí (např. elektrické ochrany, ovládání, záložní čerpadla mazacího oleje turbin, nouzové osvětlení apod.). S růstem jednotkových výkonů elektrárenských bloků a rozvojem jaderných elektráren význam doběhových zdrojů výrazně stoupl a pro tato zařízení jsou nutné nezávislé nouzové zdroje stále větších výkonů, které jsou automaticky zapínány při výpadku pracovních a záložních zdrojů. Nouzové zdroje zajišťují spolehlivý doběh a odstavení technologického zařízení, aby nedošlo k velkým škodám na zařízení a u jaderných elektráren byla zajištěna jaderná bezpečnost ve všech havarijních stavech. Tyto zdroje se uplatňují v případě, kdy dojde k odpojení alternátoru od sítě, uzavření perry do turbíny, ztrátě napětí pro vlastní spotřebu z odbočky alternátoru, ztrátě napětí pro vlastní spotřebu z nezávislé sítě. V současné době se pro velké elektrárenské bloky jako nouzové zdroje uplatňují: soustrojí, skládající se z alternátoru, poháněného vznětovým motorem nebo spalovací turbínou; akumulátorové baterie s rotačními měniči a střídači; kombinace výše uvedených zdrojů.

V konvenčních elektrárnách jsou požadavky na nouzové zdroje určeny výkonem a požadavky na ochranu důležitých zařízení před poškozením. V jaderných elektrárnách musí mít nouzové zdroje takovou spolehlivost a výkon, aby mohly napájet nouzová zařízení reaktorové části i v případě " maximální možné havárie ". Proto se v poslední době pro jaderné elektrárny řeší autonomní nouzové zdroje s optimální redundancí pro napájení spotřebičů vlastní spotřeby 1. a 2. skupiny. Tato tendence vede u největších jaderných bloků k instalaci velkých dieselagregátů, které napájejí systém prostorově a elektricky oddělených přípojníc.

1.4.2 Nouzové zdroje v konvenčních elektrárnách

V těchto elektrárnách nouzové zdroje zajišťují napájení pro rozvod zajištěného napájení; přepnutí na nouzový zdroj je prováděno bez přerušení dodávky elektrické energie. Elektrickou energii pro obvody střídavého napětí dodávají rotační měniče nebo nověji statické střídače, napájené z akumulátorových baterií.

V obr. 1.29 je schéma nouzových zdrojů pro velký elektrárenský blok. Pro napájení důležitých spotřebičů 0,4 kV (zde se připouští krátkodobé přerušení napájení po dobu startu dieselagregátu) jsou instalovány dva dieselagregáty s automatickým startem při poruše. Pro spotřebiče na střídavý proud, kde není připouštěno přerušení napájení (např. počítače, ochrany apod.) je zajištěno napájení ze střídačů. Pro stejnosměrné spotřebiče jsou instalovány akumulátorové baterie.

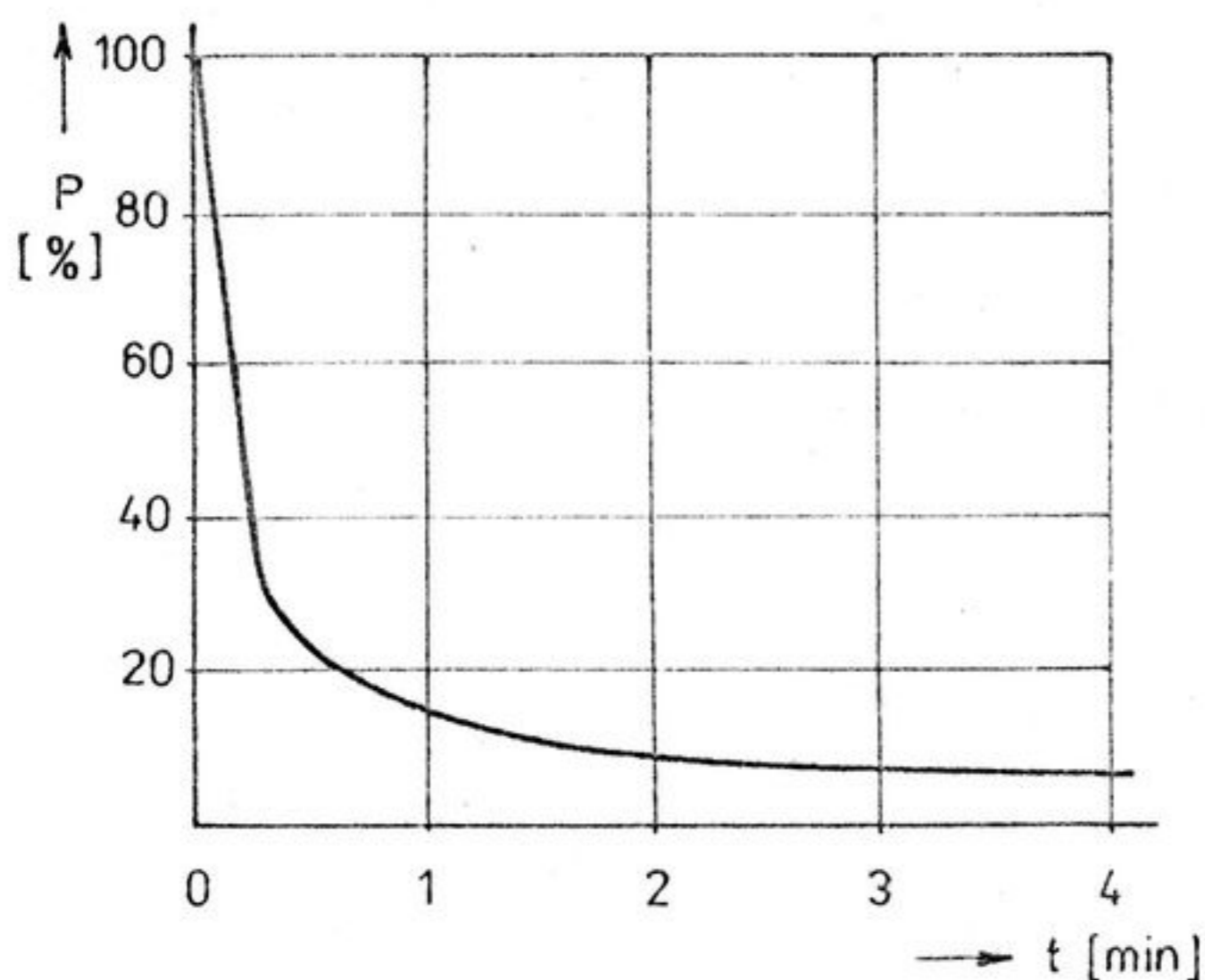


obr. 1.29 Zdroje pro nouzové napájení elektrérenského bloku

Na akumulátorovou baterii 220 V jsou napojeny zejména tyto spotřebiče :
 nouzová olejová čerpadla, těsnicí čerpadla oleje alternátoru, důležité dálk.ovládané armatury (na které působí ochrany bloku), ovládní spínačů, cívky stykačů, napájení ústřední a blokové dozorny, důležité elektropohony, střídače, mazutové hořáky, nouzové osvětlení. Na sekci dieselalternátorů 380 V jsou hlavně napojeny : natáčeací zařízení turboalternátoru, nadzvedávací olejová čerpadla, nouzová čerpadla turbinového oleje a turbonapáječák, vodíkové hospodářství turboalternátoru, motor čerpadla na chladicí vodu statoru alternátoru, armatury atd.

1.4.3 Nouzové zdroje v jaderných elektrárnách

Výkon spotřebičů, zásobených z nouzových zdrojů v konvenční části jaderné elektrárny odpovídá zhruba stejným parametrům pro stejná zařízení konvenční elektrárny. Podstatné zvětšení výkonu nouzových zdrojů a zvýšení požadavků na spolehlivost je však určeno potřebami reaktorové části elektrárny, zejména požadavky havarijního dochlazování reaktoru. Charakteristickou zvláštností jaderné elektrárny je vývoj tepla v aktivní zóně i po odstavení reaktoru, které musí být odvedeno i při úplné ztrátě napětí ve vlastní spotřebě. V obr. 1.30 je časový průběh vzniku zbytkového tepla ve vodovodním reaktoru po zapůsobení havarijní ochrany při provozu s jmenovitým výkonem.



obr. 1.30 Zbytkové teplo v reaktoru po zapůsobení havarijní ochrany reaktoru

Havarijní dochlazování, po přerušení napájení vlastní spotřeby od pracovních zdrojů a záložních zdrojů vyžaduje zajistit nouzové napájení z vysoce spolehlivých nouzových zdrojů. Nouzové zdroje musí dodat výkon pro spotřebiče důležité z hlediska jaderné bezpečnosti s redundancí; obvykle 3 x 50 %, 4 x 50 % nebo 3 x 100 %. K těmto zařízením patří zejména : zařízení pro dochlazování, nouzové chlazení, nouzová napájecí čerpadla, ventilační systémy, pohony regulací, sprchové systémy primárního okruhu, ochrany, bezpečnostní hlasiče aj. Příklad řešení nouzových zdrojů v jaderné elektrárně je v obr. 1.23 a obr. 1.25.

1.4.4 Výpočet velikosti zdrojů vlastní spotřeby

Výkon pracovních zdrojů vlastní spotřeby elektrické energie se určuje z příkonů všech spotřebičů $\sum S_p$, které musí být v chodu při maximálním výkonu bloku (hlavního technologického zařízení) :

$$\sum S_p = \frac{\sum P_{b1}}{\cos \varphi} \cdot \frac{k_s k_v}{\eta_m \eta_s} \quad (1.1)$$

kde :

$\sum P_{b1}$ instalovaný výkon všech zařízení zapojených na blokovou rozvodnu vlastní spotřeby

$k_s = \frac{\sum P_{bn}}{\sum P_{b1}}$. . . součinitel současnosti ($\sum P_{bn}$ je součet jmenovitých výkonů zařízení, které jsou současně v chodu)

$k_v = \frac{\sum P_b}{\sum P_{bn}}$. . . součinitel využití ($\sum P_b$ je součet skutečně odebíraných výkonů, které jsou současně v chodu)

η_m střední účinnost skupiny spotřebičů (motorů) při daném využití

η_s účinnost napájecí soustavy od uvažovaného místa až ke skupině spotřebičů

$\cos \varphi$ střední účinník skupiny spotřebičů.

Rovněž $\frac{k_s \cdot k_v}{\eta_m \cdot \eta_s} = \beta$ je součinitelem náročnosti

Podle výpočtového zatížení S_p se volí výkon napájecího zdroje

$$S_z \geq \sum S_p \quad (1.2)$$

Takto stanovený výkon zdroje se musí ještě prověřit, zda vyhoví i na rozběh největšího pohonu a samonajíždění napájených pohonů. V obou případech se postupuje tak, že se vypočte úbytek napětí na počátku rozběhu resp. samonajíždění a tento se porovná s maximálně přípustnou hodnotou úbytku podle normy. Při spouštění jednotlivých elektromotorů nemá napětí na přípojnících klesnout pod 0,85 jmenovitého napětí (U_n), nesmí však klesnout pod 0,8 U_n . Při samonajíždění nemá počáteční napětí klesnout pod 0,65 U_n . Nižší počáteční napětí lze připustit, prokáže-li se podrobným výpočtem možnost rozběhu elektromotorů při tomto počátečním napětí.

Výkon záložního zdroje je obvykle shodný s výkonem pracovního zdroje. V případech, že záložní zdroj je společný pro více pracovních zdrojů, volí se jeho výkon podle největšího z pracovních zdrojů. Počet záložních zdrojů závisí na technologickém řešení elektrárny.

Při blokovém řízení se volí pro dva elektrárenské bloky jeden záložní transformátor. Při třech i více blocích se volí dva záložní transformátory. Pro konvenční tepelné elektrárny se obvykle požaduje, aby záložní zdroj zajistil normální chod vlastní spotřeby elektrické energie jednoho elektrárenského bloku, chod naprázdno (doběh) dalšího bloku a pokryl 50 % odběru připojeného na společnou rozvodnu. U jaderných elektráren musí záložní transformátor obvykle zajistit normální provoz jednoho bloku a rovněž havarijní odstavení jednoho reaktorového bloku.

Při návrhu doběhových (nouzových) zdrojů na střídavý i stejnosměrný proud se musí přihlížet k časové potřebě provozu jednotlivých spotřebičů a podle toho musí být navržena kapacita resp. výkon těchto zdrojů. Sled chodu jednotlivých spotřebičů je účelné sestavit do harmonogramu.

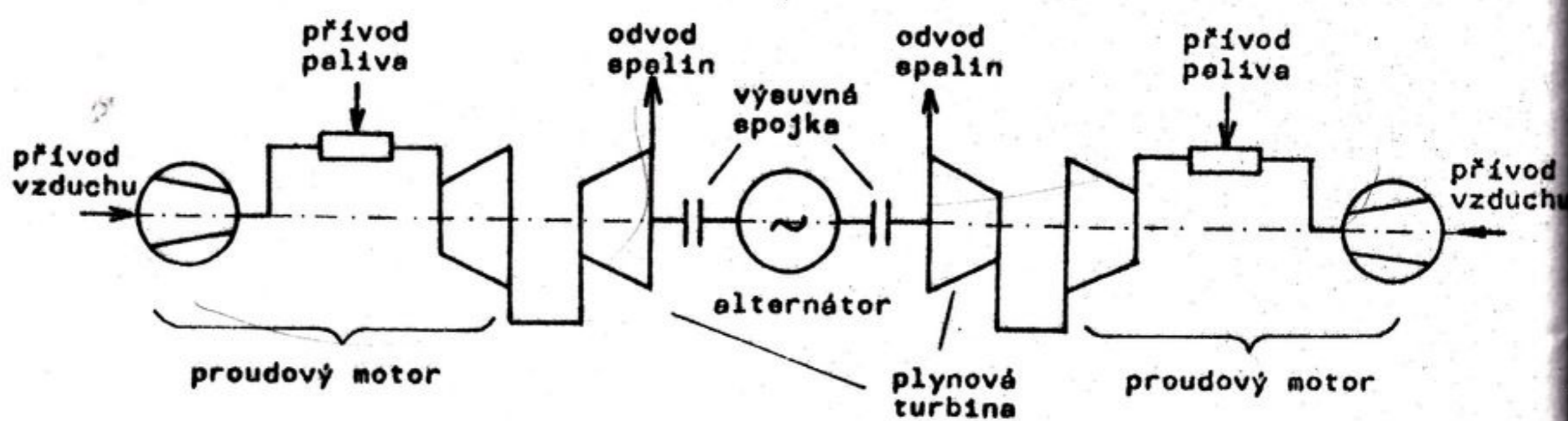
Jako základní stejnosměrné zdroje se používají akumulátorové baterie, které musí být dimenzovány tak, aby pokryly spotřebu za normálního provozního stavu, přechodné špičkové zatížení za normálního provozního stavu a spotřebu v poruchovém stavu při ztrátě střídavého napájení. V elektrárnách se používají baterie olověné (elektrolyt ředěná kyselina sírová) v tzv. pohotovostním provozu. Při tomto provozu je baterie, která byla řádně nabita, paralelně připojena k řízenému usměrňovači a zátěži. Řízený usměrňovač pokrývá spotřebu, baterie se nevybijí. Usměrňovač má být seřízen tak, aby napětí na baterii se pohybovalo v rozmezí 2,20 až 2,25 V/článek.

Pro případ selhání pracovních i záložních zdrojů jsou v elektrárnách s většími jednotkovými výkony bloků a v jaderných elektrárnách instalovány dieselagregáty. Naftový motor je nejčastěji používaným poháněcím motorem. Elektrické zapojení dieselagregátů ve vlastní spotřebě bývá různé; obvykle v elektrárně zajišťují napájení tzv. zajištěné sekce, odkud jsou napájeny nejdůležitější spotřebiče, u kterých je možno připustit krátkodobé přerušování napájení po dobu rozběhu dieselagregátů. Se zvyšujícími se výkony elektrárenských bloků rostou požadavky na výkon zajištěných spotřebičů a tím výkon dieselagregátů. Zvláště v jaderných elektrárnách se používají automatizované dieselagregáty různých výkonů až do několika MW s dobou startu za několik sekund. Od smyčkového propojení nouzových zdrojů, které vyhovovalo u menších výkonů se nyní přechází na důsledně galvanicky oddělené systémy. Oddělení se týká jak elektrického, tak i dispozičního uspořádání rozvodů, dieselagregátů s pomocným hospodářstvím a jejich provozních budov. Tímto hlediskem se řídí i ukládání kabelů jednotlivých systémů. Výpočty bylo prokázáno, že nepropojené systémy jsou oproti propojeným až o jeden řád spolehlivější.

Novým prvkem ve vlastní spotřebě elektrické energie elektráren jsou střídače, které mění přímo stejnosměrnou energii na střídavou. Střídači je zajišťována nepřetržitá dodávka střídavého proudu pro spotřebiče, které nepřipouští přerušování dodávek elektrické energie (systém ochrany a řízení reaktorů, počítače, automatiky apod.). Střídače neobsahují pohyblivé součásti, mají větší účinnost než rotační motor-generátory, jsou však citlivější na změny napájecího napětí, protože nemají setrvačné hmoty.

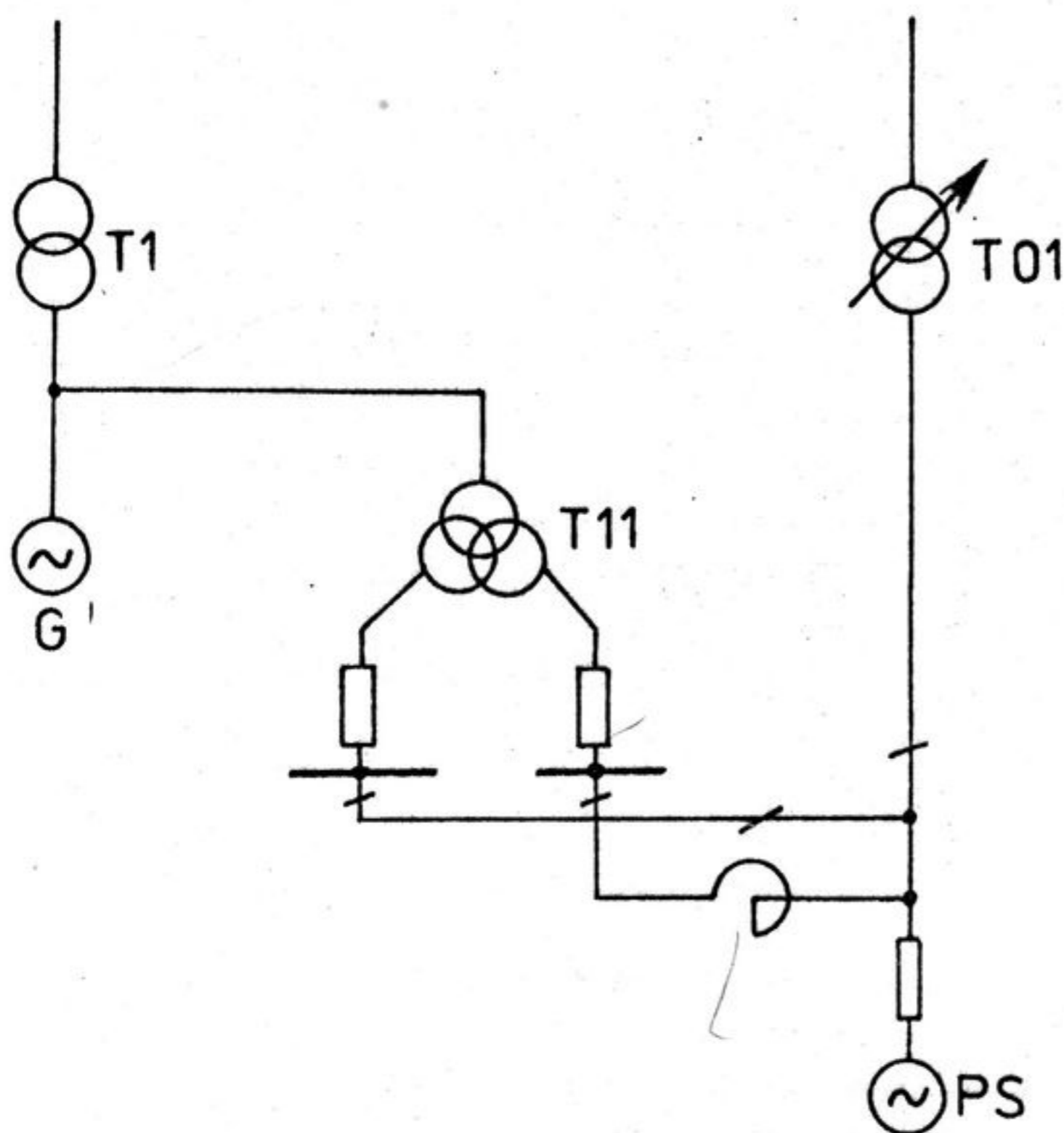
Při potřebě větších výkonů pro záložní zdroje bylo v ojedinělých případech pro velké bloky použito plynového soustrojí. Pro vysoké pořizovací náklady je toto soustrojí řešeno více-účelově a může plnit funkce zdroje pro uvedení elektrárny do provozu bez dodávky z vnější sítě, záložního zdroje napájení vlastní spotřeby elektrické energie při selhání dodávky elektrické energie ze sítě nebo při poklesu kmitočtu v elektrizační soustavě, jako zdroje pro krytí špičkové dodávky elektrické energie do sítě nebo jako kompensátor. Hlavní nevýhodou soustrojí poháněného plynovou turbinou pro napájení vlastní spotřeby je dlouhá doba rozběhu.

V obr. 1.31 je alternátor poháněn plynovými turbinami, které jsou napojeny na letecké i proudové motory. Palivem je letecký petrolej.



obr. 1.31 Soustrojí poháněné dvěma leteckými motory

V obr. 1.32 je elektrické schéma zapojení soustrojí s proudovými motory, spalovacími turbinami a alternátorem, které umožňuje dodávku elektrické energie do sítě.



obr. 1.32 Elektrické schéma zapojení plynového soustrojí

1.5 Pohony a jiné spotřebiče ve vlastní spotřebě elektrické energie elektráren

Každé strojní zařízení má charakteristické vlastnosti, důležité pro volbu vhodného elektromotoru, z nich jsou nejdůležitější příkon a záběrný moment, které pak ovlivňují volbu elektromotoru a napájecího zdroje z hlediska proudového zatížení, doby trvání rozběhu a poklesu napětí.

V elektrárenském provozu se jedná o pohony strojních zařízení při :

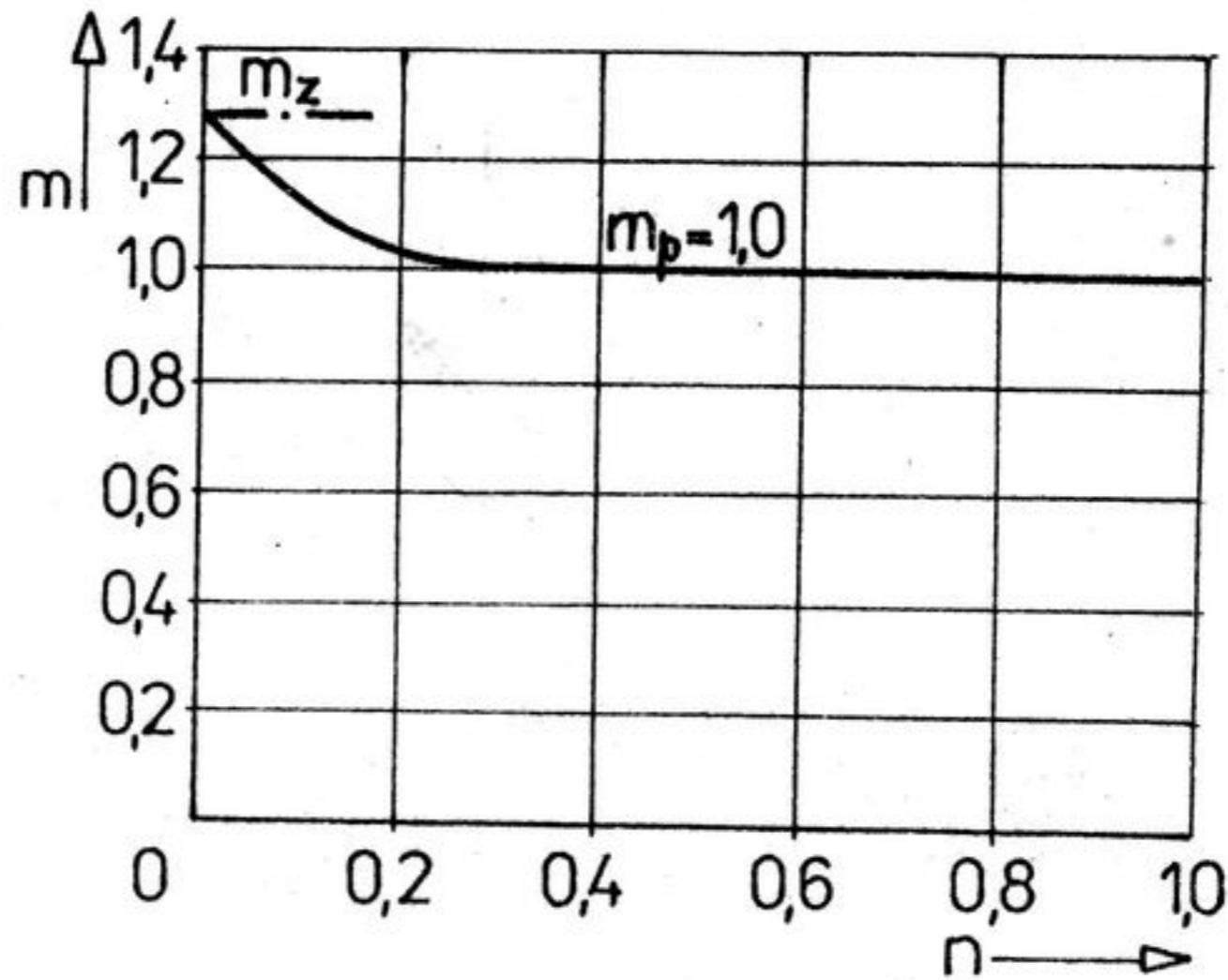
- dopravě tuhých hmot (dopravníky, podavače a pod.)
- úpravě tuhých hmot (drtiče, mlýny apod.)
- dopravě tekutin (čerpadla)
- dopravě a stlačování plynů (ventilátory, kompresory).

Momentové charakteristiky zařízení vlastní spotřeby elektráren lze rozdělit do dvou základních skupin:

a/ Momentové charakteristiky poháněných strojů se stálým momentem

Při pohonu vodorovných dopravníků, podavačů, roštů apod. lze při malých rychlostech zanedbat odpor vzduchu a uvažujeme pouze tření, které je třeba překonávat. Momentová charakteristika je přímka, která se pouze mění při malých otáčkách, kdy je třeba většího momentu pro

rozběh pohonu z klidu.



kde :

m_n jmenovitý moment pohánějícího elektromotoru

m_p moment zatížení

obr. 1.33. momentová charakteristika stroje se stálým zátěžným momentem

Stálý střední moment v závislosti na otáčkách mají také pístová, zubová čerpadla a kompresory. Záběrný moment při spouštění proti plnému tlaku bývá :

$$m_z \approx 1,3 m_n$$

Jestliže se spouštějí tyto stroje při odlehčení, pak bývá záběrný moment

$$m_z = (0,2 \div 0,5) m_n$$

b/ Momentové charakteristiky poháněných strojů

K dopravě kapalin a plynů se používá proudových strojů, to jsou zejména

- čerpadla
- ventilátory
- turbokompresory

Každý z těchto druhů strojů má odlišné vlastnosti, ovlivňující pohon, zejména příkonovou charakteristiku při změně množství dodávaného plynu nebo kapaliny. Měníme-li otáčky proudového stroje z hodnoty n_1 na hodnotu n_2 mění se všechny body charakteristiky podle těchto vztahů :

$$\text{Množství} \dots Q_2 = \frac{n_2}{n_1} Q_1$$

$$\text{Tlak} \dots p_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 p_1$$

Příkon $P_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 P_1$

Moment $M_2 = \frac{n_2}{n_1} M_1$

Momentovou charakteristiku poháněných strojů s momentem závislým na otáčkách můžeme vyjádřit v poměrných jednotkách :

$$m_p = \underbrace{m_{po}}_A + \underbrace{(m_{pl} - m_{po})}_{B} \cdot \left(\frac{n}{n_s}\right)^\alpha$$

kde $m_{po} = \frac{M_{po}}{M_n}$... poměrný moment zařízení

při $\frac{n}{n_s} = 0$ ($n = 0$), kde M_{po} je moment poháněného zařízení na počátku rozběhu

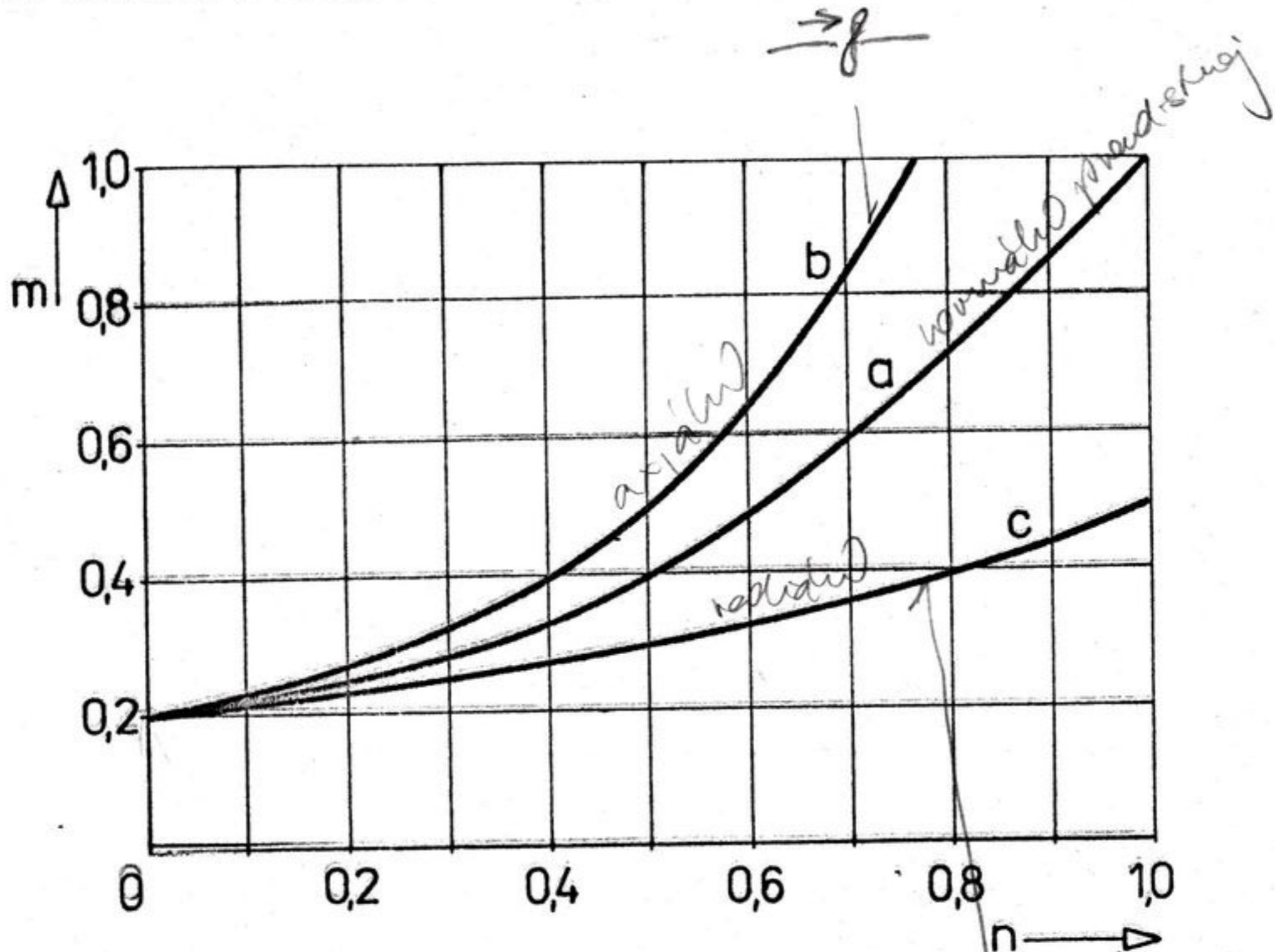
Hodnota m_{po} se obvykle volí $m_{po} = 0,1 + 0,2$

$m_{pl} = \frac{M_{pl}}{M_n}$ poměrný moment při otáčkách $\frac{n}{n_s} = 1$
($n = n_s$)

n_s ... synchronní otáčky

α ... součinitel, jehož velikost závisí na druhu poháněného zařízení

Průběh momentu může být různý podle zatížení stroje, například podle otevření armatur. U osových strojů je třeba pro chod s uzavřenými výstupními armaturami většího momentu než při normálním zatížení, u strojů radiálních je tomu naopak (obr. 1.34).



obr. 1.34 Závislost poměrného momentu zatížení na otáčkách

- m poměrná hodnota momentu zatížení
- a normální zatížení proudového stroje
- b axiální ventilátor nebo čerpadlo s uzavřenými výstupními armaturami
- c radiální ventilátor nebo čerpadlo s uzavřenými výstupními armaturami

1.5.1 Pohony v konvenčních tepelných elektrárnách

Pohony v zauhlování

Uhlí se dopravuje do elektrárny buď železničními vagony (případně vodní cestou čluny), často se elektrárna zásobuje uhlím přímo z dolu pasovou dopravou. Palivo se u menších zařízení vykládá z vagonů pomocí korečkových vykladačů nebo výklopníků, pro velké elektrárny jsou použity samovysypné vagony s vykládkou do šterbinových zásobníků. Odtud přes propelerové vyhrnovače a pasy je uhlí dopravováno do kotelny, nebo na uhelnou skládku. Zásoby paliva se ukládají na skládku, která má zařízení pro dopravu paliva na skládku, pro rozmístění paliva na skládce a dopravu ze skládky do kotelny vesměs s elektrickými pohony. Ve zvláštních případech je použito složitější zařízení pro homogenizaci uhlí. V objektu elektrárny se palivo dopravuje vodorovnými a šikmými dopravními pasy. Všechny svislé i šikmé dopravníky musí být vybaveny brzdovým zařízením, které zabranuje, aby se po vypnutí elektromotoru nebo při ztrátě napětí neroztočil pas obráceně a zasypal uhlím výsypky v dopravních cestách a okolí.

Pohony kotlů

V kotlích jsou hlavními technologickými medii palivo, vzduch a voda, které je třeba v rámci technologického procesu dopravovat a upravovat jejich parametry. Napájecí voda se dodává do kotle napáječkami přes ohřivače vody. Vzduch se nasává vzduchovými ventilátory, prochází ohřivači vzduchu a dopravuje se do spalovacího prostoru kotle. Flynné spaliny jsou přes odlučovací zařízení (obvykle elektrofiltry) dopravovány kouřovými ventilátory do komína.

Větší ventilátory mají většinou elektricky řízené klapky a natáčení lopatek. Při regulaci hydraulickou skluzovou spojkou (např. napáječek) jsou tato zařízení vybavena olejovým čerpadlem a chladičím zařízením. Při mlecích okruzích s přímým foukáním se dodává palivo ze zásobníku surového uhlí podavačem do mlýna, kde se rozemílá na prášek, který se s částí ohřátého vzduchu nebo spalin vhání do topeniště. Zde se mísí s větší částí vzduchu dopravovaného vzduchovými ventilátory. U mlecích okruhů s odloučením prášku se uhlí ze zásobníků dodává podavačem surového uhlí do mlýna, odkud se odsává přes třídič a cyklon mlýnským ventilátorem do brýdových hořáků. Z cyklonu se prášek dopravuje podavači do práškovodu a vzduchem z primárního ventilátoru se dopravuje do hořáků. Zde se prášek mísí se vzduchem do dávaným vzduchovým ventilátorem.

Škvára se zpravidla odstraňuje vynašeči strusky, splavuje se do drtičů a je dále dopravována hydraulicky vodou do bagrovacích jímek a na složiště. Popílek z odlučovačů se dopravuje buď pneumaticky nebo hydraulicky do zásobníků nebo na složiště. K práškovým kotlům patří také hospodářství topných olejů. Ze zásobní nádrže se olej čerpá do provozní nádrže v elektrárně čerpadly. Odtud se čerpá do zapalovacích hořáků, kde se topný olej společně s přiváděným vzduchem spaluje.

Pohony ve strojovně

Ložiska turbíny jsou normálně mazána mechanickým olejovým čerpadlem, při najíždění se používá elektrických najížděcích čerpadel oleje. Při poruchách automaticky nabíhá rezervní olejové čerpadlo. Před spouštěním a po odstavení musí být rotor turbosoustrojí natáčen elektrickým natáčecím zařízením k vyrovnání teplot, aby nedošlo k deformaci hřídelů. Zvláštní čerpadla oleje vytváří před spouštěním v každém ložisku turboalternátoru olejový film (zvedací čerpadla) .

Všechny důležité armatury přívodních a výstupních potrubí turbíny jsou vybaveny elektrickými pohony.

U kondenzačních turbin jsou dalšími velkými pohony chladicí čerpadla. Paralelně mohou být připojeny chladiče oleje, chlazení alternátoru apod. Kondenzát se čerpá kondenzátními čerpadly přes nízkotlaké regenerační ohříváky do napájecí nádrže, odkud se čerpá napaječkami přes vysokotlaké ohříváky napájecí vody do kotlů.

Kromě výše uvedených hlavních pohonů je v elektrárně řada různých dalších spotřebičů, které pracují buď trvale nebo přerušovaně. Patří sem pohony čerpací stanice surové vody, pohony v úpravě chladicí a napájecí vody, různá čerpadla pro chlazení, spotřebiče pro měření a řízení, výtahy, jeřáby, osvětlení, pomocné provozy a další.

1.5.2 Pohony ve vodních elektrárnách

K vypouštění přebytečné vody v přehradě slouží jalové výpustě vybavené stavidly. Výpustě jsou ovládány mechanismy s elektrickým pohonem. Větší přehrady regulují množství přepouštěné vody regulačními klapkami, segmenty nebo zdvihacími tabulemi rovněž s elektrickými pohony. Klapky mají mnohdy elektrické vytápění, aby v zimě nezamrzaly.

Velké přehrady se vybavují základovými výpustěmi, které mají hydraulické nebo elektrické pohony s elektrickým ovládním. Do turbin vtéká voda u nízkotlakých elektráren přes česlice, které jsou vybaveny strojem na čištění. Práce tohoto stroje se uskutečňuje pomocí řady elektropohonů pro posuv a pojezd stroje, vyklápění škrabky do vozíku apod. Před vtokem do turbíny je umístěno stavidlo, které uzavírá přítok vody k turbíně a má buď mechanický nebo hydraulický elektricky ovládaný pohon. Před česlicí a stavidlo se umísťují hradidla usazovaná do drážek jeřábem s elektrickým pohonem. Pro řízení technologického procesu vodní elektrárny se používá tlakového oleje dodávaného čerpadly regulátorového oleje do větrníku, který tvoří zásobu pro případ častější funkce, nebo pro případ poruchy. Čerpadla oleje jsou neustále v provozu. Z větrníku se rozvádí olej do regulátoru otáček, dále k servomotorům rozváděcího kola, u Kaplanových turbin i oběžného kola.

Velmi důležité je mazání ložisek. Pro najíždění a pro případ poruchy jsou instalována čerpadla mazacího oleje se střídavým nebo stejnosměrným poháněcím elektromotorem.

Voda unikající z ucpávky turbíny se odčerpává čerpadly prosáklé vody.

Voda k chlazení ložiskového oleje a alternátoru se čerpá ze spodní vody zvláštními čerpadly, nebo se přímo používá tlakové vody z přehrady. Ve vysokotlakých elektrárnách se do přívodního potrubí před turbínu instaluje kulové šoupě jako těsný uzávěr tlakové vody. K pohonu šoupě se používá buď hydraulický pohon tlakovým olejem nebo tlakové vody z přehrady. Olej se dopravuje zubovým čerpadlem do větrníku, odkud se pomocí elektroventilů vpouští do servomotoru, který provede příslušnou manipulaci.

1.5.3 Elektrické pohony a spotřebiče v jaderných elektrárnách

Provoz většiny spotřebičů v jaderných elektrárnách má vyšší nároky na spolehlivost napájení elektrickou energií než u spotřebičů v konvenčních tepelných elektrárnách. Některá zařízení mají speciální nároky na zajištění dodávky elektrické energie z hlediska technologického procesu jaderné elektrárny.

Mezi zvlášť důležité pohony a spotřebiče patří :

Hlavní oběhová čerpadla - zajišťují oběh chladiva u jaderných elektráren s tlakovodními reaktory přes aktivní zónu. V současné době se používají dva typy těchto čerpadel :

- bezucpávková čerpadla,
- ucpávková čerpadla s řízeným průsakem vody.

Bezucpávkové čerpadlo tvoří asynchronní motor s kotvou nakrátko a hydraulická část. Obě tyto části jsou spojeny do jednoho konstrukčního celku. Tato čerpadla se vyznačují tím, že mají malé setrvačné hmoty a proto jsou velmi citlivá na krátkodobé poklesy napětí. Při jejich použití je nutné řešit vlastní spotřebu jaderných elektráren tak, aby bylo možné využít elektrického doběhu alternátoru při poruchách.

V současné době se dává přednost použití ucpávkových čerpadel s pohonem asynchronním motorem zejména u bloků velkých jednotkových výkonů. Tato čerpadla mají setrvačnick umístěný přímo na hřídeli motoru a dosahují tak delší čas doběhu. Tím se zabezpečuje po určitou dobu nucený oběh chladiva v primárním okruhu a dochlazování reaktoru v případě výpadku vlastní spotřeby. Tato čerpadla mají i vyšší účinnost, elektromotor není v bezprostředním styku s radioaktivní látkou a proto se může při poruše snadno vyměnit. V jaderných elektrárnách s plyným chlazením se používají turbokompresory velkého výkonu, které jsou poháněny synchronními motory. Za každého provozního stavu i při ztrátě napětí ve vlastní spotřebě musí být u turbokompresorů zajištěno spolehlivé utěsnění hřídele a mazání ložisek.

V jaderných elektrárnách, kde se používá tekutý kov pro chlazení jsou hlavní oběhová čerpadla provedena jako odstředivá čerpadla.

Elektroohříváče kompensátoru objemu patří mezi důležité spotřebiče vlastní spotřeby jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Například u elektrárny VVER 440 je v tělese kompensátoru 120 ohřívacích bloků, které mají při spouštění reaktoru příkon asi 1440 kW, při ustáleném provozu je podstatně menší a odpovídá krytí tepelných ztrát kompensátoru. Část ohříváčů o výkonu asi 180 kW musí mít nouzové napájení při ztrátě napětí ve vlastní spotřebě, aby bylo zajištěno udržení tlaku a zabráněno varu chladiva v primárním okruhu.

V jaderných elektrárnách chlazených tekutým kovem jsou elektroohříváči vybavena všechna zařízení, kde je při ochlazení možný přechod kovu do pevné fáze (potrubí, klapky, čerpadla, výměníky tepla, parogenerátory, zásobníky kovu apod.). Výkon elektroohříváčů může dosahovat až několika MW.

Pohony čerpadel chladicí a technické vody vyžadují vyšší nároky než obdobná zařízení konvenčních tepelných elektráren. Je to způsobeno tím, že u jaderných elektráren s tlakovodními reaktory pracují turbíny se sytou párou, vyšší měrnou spotřebou páry a množství chladicí vody pro kondenzátory je asi 1,5 až 2 krát vyšší než u odpovídající konvenční elektrárny.

Elektrická zařízení systému ochrany a řízení vyžadují vysokou spolehlivost zajištění vlastní spotřeby elektrické energie při normálním provozu i při poruchových stavech. Jedná se zejména o zařízení, která zabezpečují kontrolu jaderných a tepelných parametrů reaktoru (regulační tyče, havarijní tyče, regulace neutronového toku). Některá zařízení nedovolují ani krátkodobé přerušování dodávky elektrické energie, jako například měření radioaktivity, neutronového toku, otravy reaktoru, dále jsou to počítače a zařízení dozoren.

Elektrická zařízení dopravně - technologických systémů, která zajišťují všechny dopravní situace včetně přemísťování vyhořelého paliva. Přeprava vyhořelého paliva s vysokou radiaktivitou musí být dokončena za každé situace a proto musí mít pohony možnost napájení i z nouzového (autonomního) zdroje.

Elektrozařízení systému dozimetrie a speciální ventilace vyžadují napájení střídavým i stejnosměrným napětím. Zvláště vysoké nároky na spolehlivé napájení mají systémy, zajišťující kontrolu těsnosti palivového článku a reaktoru jako celku a systémy pro kontrolu obsahu aerosolů ve vzduchu v provozních prostorech.

Zařízení speciální ventilace má značně větší příkon než zařízení v podobné konvenční elektrárně.

1.5.4 Volba elektromotorů pro pohony zařízení vlastní spotřeby elektráren

Při volbě motoru pro pohon zařízení vlastní spotřeby musíme přihlížet především k provozním podmínkám a požadavkům technologického zařízení. Dalšími základními požadavky jsou spolehlivost a hospodárnost provozu elektrických pohonů, jejich hospodárnost z hlediska pořizovacích nákladů, obsluhy a údržby.

Základním požadavkem na elektromotory pro provoz v elektrárnách je dosažení co největší provozní bezpečnosti v nepříznivém elektrárenském prostředí s velkou prašností, případně vyšší okolní teplotou. Dále je třeba aby elektromotor splňoval tyto základní provozní podmínky :

- 1/ Elektromotor musí mít odpovídající, dostatečně velký výkon s ohledem na provoz technologického zařízení při jmenovitém výkonu i při přechodných stavech. Na druhé straně nutno se vyvarovat předimenzování výkonu, protože při provozu málo zatíženého pohonu se zhoršuje účinnost.
- 2/ Momentová charakteristika motoru musí být volena tak, aby byl zajištěn plynulý rozběh zařízení.
- 3/ Studený motor s výchozí teplotou vinutí 40°C musí být možno zapnout třikrát bezprostředně za sebou i při těžkých, déletrvajících rozbězích.
- 4/ Provozně teplý motor s výchozí teplotou vinutí 120°C musí být možno po vypnutí zapnout dvakrát po sobě.
- 5/ U elektromotorů je nutno počítat s častými rozběhy motorů (asi 150 - 440 krát do roka, t.j. asi 5000 krát za dobu životnosti elektrárny).
- 6/ Záběrový proud motoru nemá překročit hodnotu 5,5 In.
- 7/ Stanovená nejvyšší přípustná doba setrvání asynchronního motoru vn ve stavu nakrátko pro čs. energetiku 5sec - pro dvou až čtyřpólové asynchronní motory, 10sec - pro šestipólové motory.
- 8/ Elektromotor musí spolehlivě pracovat i při snížení napájecího napětí na $0,7 U_n$ při 50Hz s poměrným momentem zatížení $1,0 M_z$ po dobu minimálně 15 minut.
- 9/ Předpokládá se bezporuchový provoz bez požadavků na revizi po dobu 3 let (t.j. asi 15 tisíc provozních hodin).
- 10/ Elektropohony musí vyhovovat podmínkám samonajíždění a zapínání motoru při nesouhlasu fáze napětí doznívajícího a napětí sítě což se projeví při samočinném zapínání rezervy elektrické energie. Po úplné ztrátě napětí na dobu $2\frac{1}{3}$ sec musí elektromotor snést samonajíždění s plně zatíženými poháněnými stroji při napětí $0,70$ až $0,65 U_n$.
- 11/ Maximální moment motoru má být větší než $2M_n$.
- 12/ Hlučnost motoru má být menší než 85 dB.

Všem těmto uvedeným hlediskům vyhovuje v provozu elektráren nejlépe asynchronní motor s kotvou nakrátko.

Z hlediska snadné regulace otáček v širokých mezích by byl výhodnější jiný typ motorů např. stejnosměrný motor nebo střídavý komutátorový motor, ale otázky spolehlivého chodu, jednoduché obsluhy a odolnosti proti nepříznivým vnějším vlivům vedly k tomu, že v našich elektrárnách převládá využití jednoduchého asynchronního motoru s kotvou nakrátko.

Při použití pohonů s výkony zhruba vyššími než 5 až 6 MW je výhodnější použít synchronní motory, které mají vyšší účinnost a neodebírají jalovou energii ze sítě. Tyto motory se používají zejména pro pohon turbokompresorů v jaderných elektrárnách s plynovým chlazením primárního okruhu.

Asynchronní motory s kotvou kroužkovou, které mají velký záběrný moment se používají v provozu elektráren pouze výjimečně, protože vyžadují poměrně složitá spouštěcí zařízení, která nejsou vhodná pro pohon zařízení ve vlastní spotřebě jednak pro poruchovost automatických spouštěčů a potíže při samonajíždění takových pohonů.

Volba hlavních parametrů elektromotorů

1/ Napětí elektromotoru

Volba jmenovitého napětí motoru souvisí s jeho jmenovitým výkonem a otáčkami.

Pro motory o výkonu zhruba do 250 kW používáme jmenovité napětí 380V. Vyjimečně lze použít ve zdůvodněných případech napětí 500V (s izolovanou nulou) kde se výkon motoru může uvažovat až 350 kW.

Napětí 6 kV se používá v ČSSR od výkonu motoru 300 kW pro stroje dvoupólové a pro více-pólové stroje od výkonu 200 kW výše. Tato kritéria nelze uplatňovat striktně bez posouzení dalších technicko-ekonomických hledisek, kdy je třeba přihlížet k investičním nákladům na zařízení, ztrátám při provozu zařízení apod.

Závažnou okolností při volbě napětí elektromotoru je vznik přepětí u elektromotorů menších výkonů v síti 6 kV při jejich vypínání.

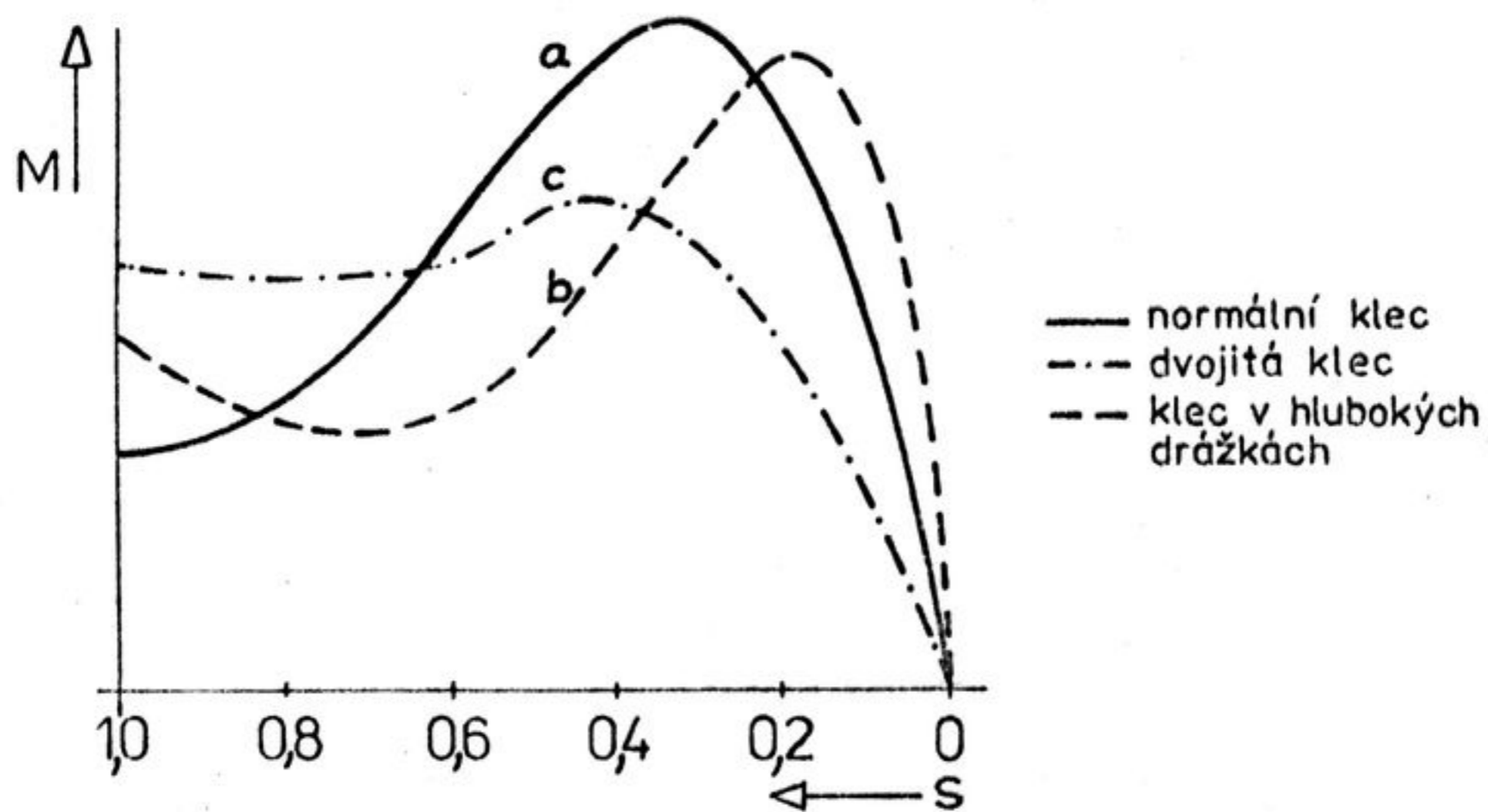
2/ Volba výkonu elektromotoru

Výkon elektromotoru se volí 1,1 až 1,15 příkonu poháněného zařízení a dále musí být respektovány zásady uvedené ve všeobecných požadavcích. To je především otázka plynulého rozběhu zařízení, doba rozběhu, nebo speciální požadavky poháněného zařízení. Maximální výkony asynchronních motorů s kotvou nakrátko dosahují v současných podmínkách hodnoty do 10 MW s použitím vzduchového chlazení. Pro větší výkony se uvažuje použít vodního chlazení vinutí statoru. V našich konvenčních tepelných elektrárnách je největším elektropohonem asynchronní motor napáječek, který má výkon 4 MW u bloku 200 MW a 8,6 MW u bloku 500 MW.

Volba momentové charakteristiky motoru. Rozběh motoru

Momentové charakteristiky asynchronních motorů jsou určeny konstrukčním provedením motoru. Na obr. 1.35 jsou uvedeny charakteristické průběhy pro :

- a ... asynchronní motor s normálně provedenou klecí
- b ... asynchronní motor s klecí rotoru v hlubokých drážkách
- c ... asynchronní motor s dvojitou klecí



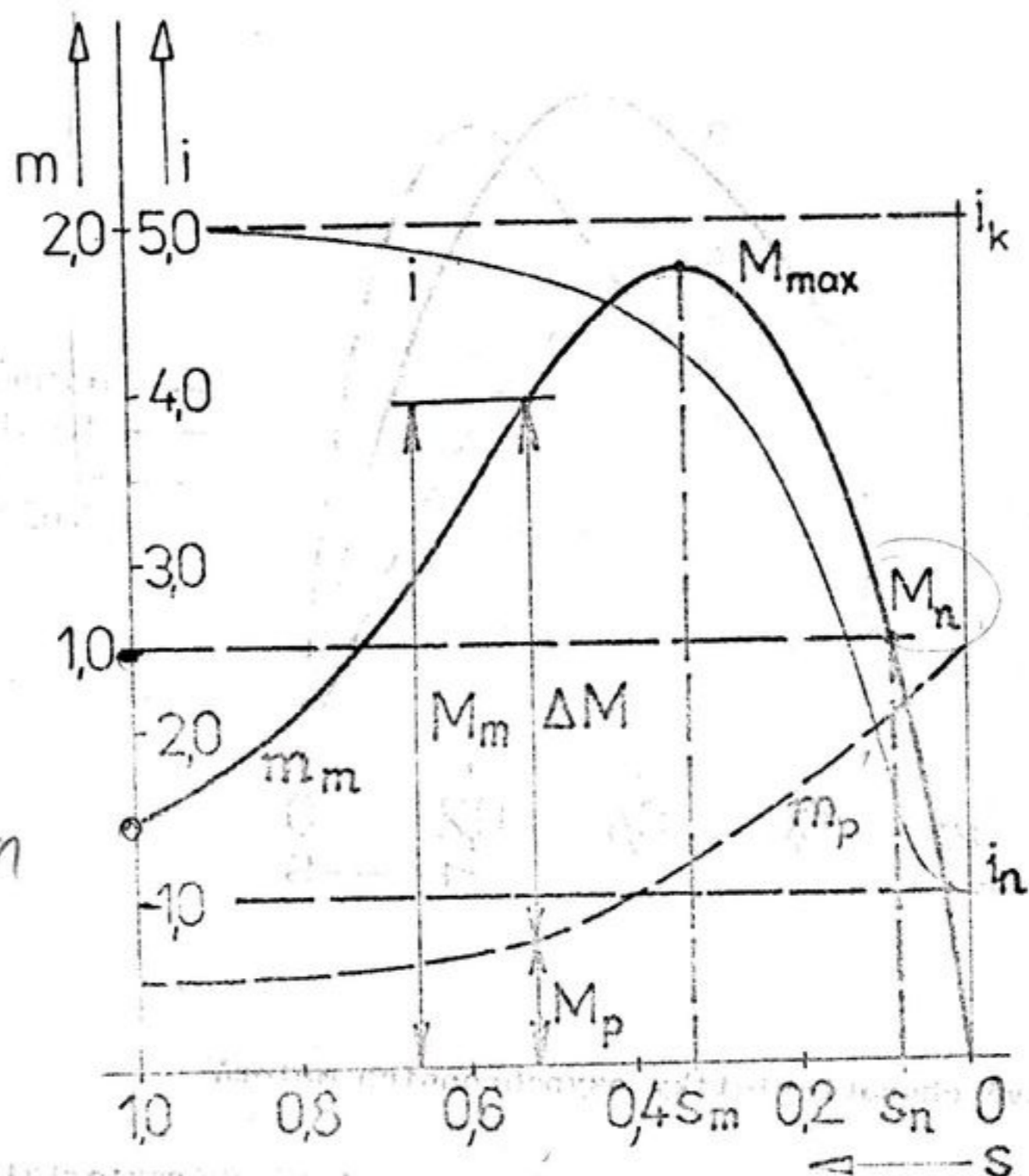
obr. 1.35 Momentové charakteristiky asynchronních motorů

Rozběh zařízení je určen nejen průběhem momentové charakteristiky, ale i průběhem momentové charakteristiky poháněného zařízení. Pro průběh a trvání rozběhu je důležitá hodnota rozdílu mezi momentem motoru a momentem zařízení, tzv. dynamický moment.

Na obr. 1.36 je znázorněna charakteristika proudového stroje a jeho elektropohonu, kde je označeno dále :

- m_p ... momentová charakteristika poháněného zařízení
- m_m ... momentová charakteristika asynchronního motoru
- ΔM ... dynamický urychlující moment

$$\Delta M = M_m - M_p$$



obr. 1.36 Momentová charakteristika pohonu a zatížení

Aby rozběh motoru a zařízení probíhal plynule, měl by být dynamický moment nejméně $0,2 M_n$. Tento požadavek je většinou splněn tehdy, platí-li tato podmínka v okamžiku rozběhu:

$$\Delta M > 0,2 M_n$$

Při spouštění, kdy otáčky motoru jsou nulové, je navíc třeba, aby motor překonával pasivní odpory stojícího zařízení. Dále je třeba, aby stanovená podmínka byla splněna i při předpokládaném dovoleném poklesu napětí:

$$M_z \cdot u_z^2 - M_{po} \geq 0,2 M_n \quad (1.3)$$

na poč. vztěhu

kde:

u_z ... napětí na svorkách motoru při rozběhu ($S=1$)

$$u_z = \frac{U_n - \Delta U_{max}}{U_n} \quad (1.4)$$

M_z ... záběrný moment motoru ($S=1$)

M_{po} ... moment poháněného zařízení na počátku rozběhu ($S=1$)

Pak je poměrná hodnota záběrného momentu:

$$m_z = \frac{M_z}{M_n}$$

Dosadíme do vztahu (1.3):

$$M_n \left(\frac{M_z}{M_n} \cdot u_z^2 - 0,2 \right) \geq M_{po} \quad (1.5)$$

Pak pro jmenovitý moment platí :

$$M_n \geq \frac{1}{m_z \cdot u_z^2 - 0,2} \cdot M_{po} \quad (1.6)$$

Jmenovitý moment je určen činným výkonem na hřídeli při jmenovitém skluzu :

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (1.7)$$

Splnění podmínky (1.6) můžeme docílit dvěma způsoby:

- 1/ Volbou asynchronního motoru s dostatečně velkým záběrným momentem
- 2/ Volbou asynchronního motoru s odpovídajícím, dostatečně velkým jmenovitým výkonem motoru

Stanovení doby rozběhu motoru

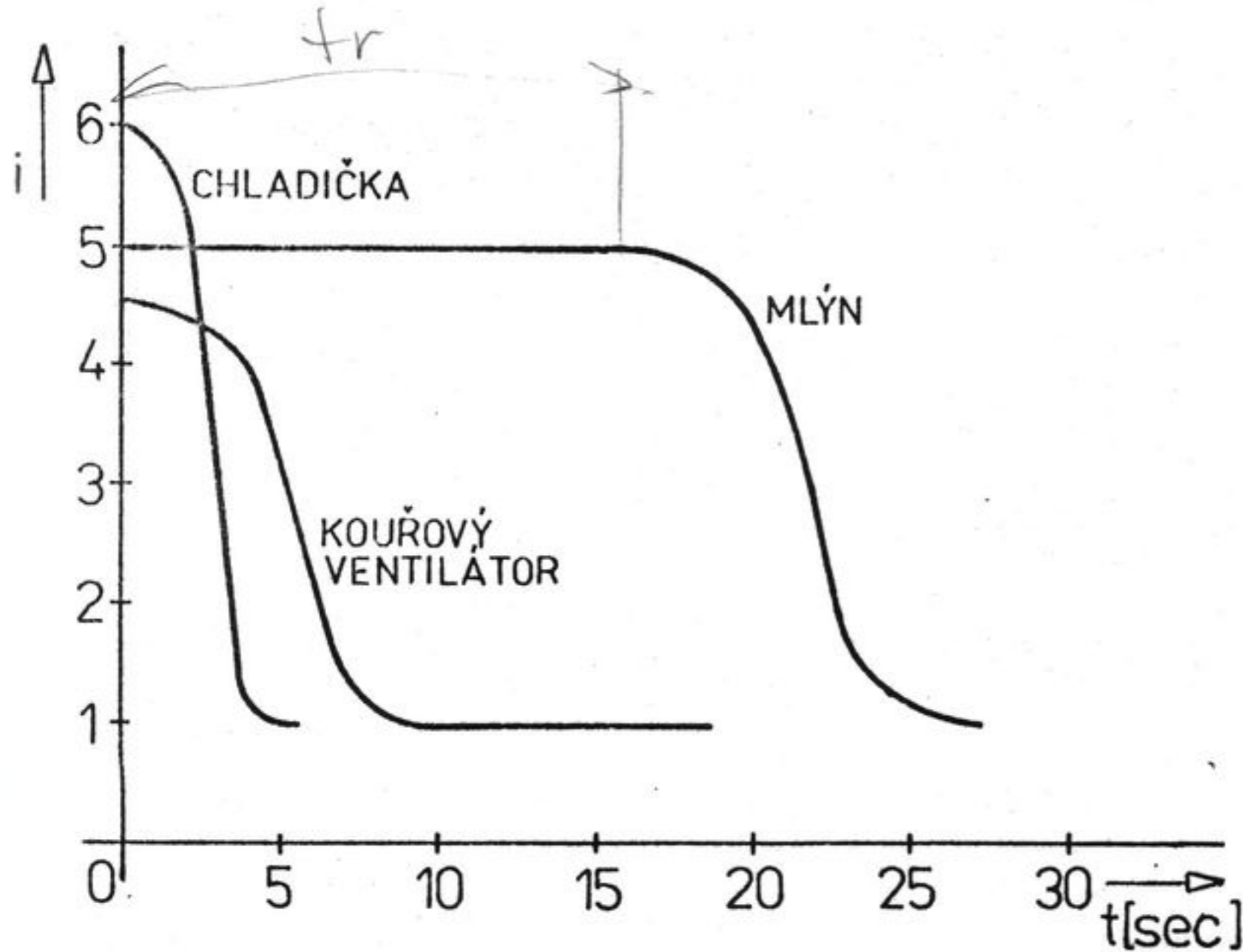
Záběrový proud je po dobu rozběhu konstantní, doba rozběhu je určena charakterem zatížení .

Doby rozběhu některých typických elektrických pohonů v podmínkách tepelných konvenčních elektráren v ČSSR :

- Mlýny ... 30 ÷ 35 sec
- Kouřové ventilátory ... 7 ÷ 10 sec
- Napáječky 6 ÷ 8 sec
- Vzduchové ventilátory . 3 ÷ 4 sec

- chladičky } ... 2 ÷ 3 sec
- kondenzátky } ... 2 ÷ 3 sec
- vodoproudé vývěhy }

Průběhy záběrového proudu v závislosti na čase jsou uvedeny na obr. 1.37 pro některé typické pohony v elektrárnách:



obr.1.37 Průběh záběrového proudu pro různé technolog.zatížení

Stanovení doby rozběhu je možné provést dvěma způsoby :

- 1/ Měřením doby rozběhu na daném zařízení nebo na obdobném zařízení
- 2/ Výpočtem ze známých charakteristik zátěže a momentové charakteristiky motoru.

Dobu rozběhu určíme podle rozběhové charakteristiky stroje, tzv. závislosti otáček na čase $n = f(t)$

Změna otáček soustrojí je určena vztahem :

$$\Delta M = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad [Nm; \text{kgm}^2; \text{rad/s}; s] \quad (1.8)$$

kde :

J ... moment setrvačnosti rotujících hmot

ω ... mechanická úhlová rychlost

Dále si označíme následující veličiny v poměrných jednotkách :

$$\omega_{p.j.} = \frac{\omega}{\omega_s} \quad - \text{úhlová rychlost}$$

$$n_{p.j.} = \frac{n}{n_s} \quad - \text{otáčky}$$

$$\Delta m = \frac{\Delta M}{M_n} \quad - \text{dynamický moment}$$

Pak platí :

$$\frac{d\omega}{dt} = \omega_s \frac{d\omega_{p.j.}}{dt} = \omega_s \frac{dn_{p.j.}}{dt}$$

Dynamický moment :

$$\Delta M = J\omega_s \frac{dn_{p.j.}}{dt} \quad (1.9)$$

Integrací určíme dobu rozběhu, to znamená čas, kdy se změní otáčky z $n_{1 p.j.}$ na $n_{2 p.j.}$:

$$t = \int_{n_{1 p.j.}}^{n_{2 p.j.}} \frac{J\omega_s}{\Delta M} dn_{p.j.} = \frac{J\omega_s}{M_n} \int_{n_{1 p.j.}}^{n_{2 p.j.}} \frac{1}{\Delta m} \cdot dn_{p.j.} \quad (1.10)$$

Mechanická časová konstanta - normální doba rozběhu - doba náběhu :

$$T_m = \frac{J\omega_s}{M_n} \quad [s; \text{kgm}^2; \text{rad/s}; Nm] \quad (1.11)$$

Sestrojení rozběhové nebo doběhové charakteristiky daného zařízení můžeme provést na základě řešení rovnice (1.10).

K tomu potřebujeme znát :

- momentovou charakteristiku motoru M_m
- momentovou charakteristiku zátěže M_p
- mechanickou časovou konstantu T_m

U některých technologických zařízení je místo momentu setrvačnosti uváděn setrvačný moment - GD^2

$$J = \frac{GD^2}{4g} \quad [\text{kgm}^2; \text{Nm}^2; \text{n/s}^2]$$

$$g = 9,81 \quad [\text{m/s}^2]$$

Pak lze určit mechanickou časovou konstantu takto :

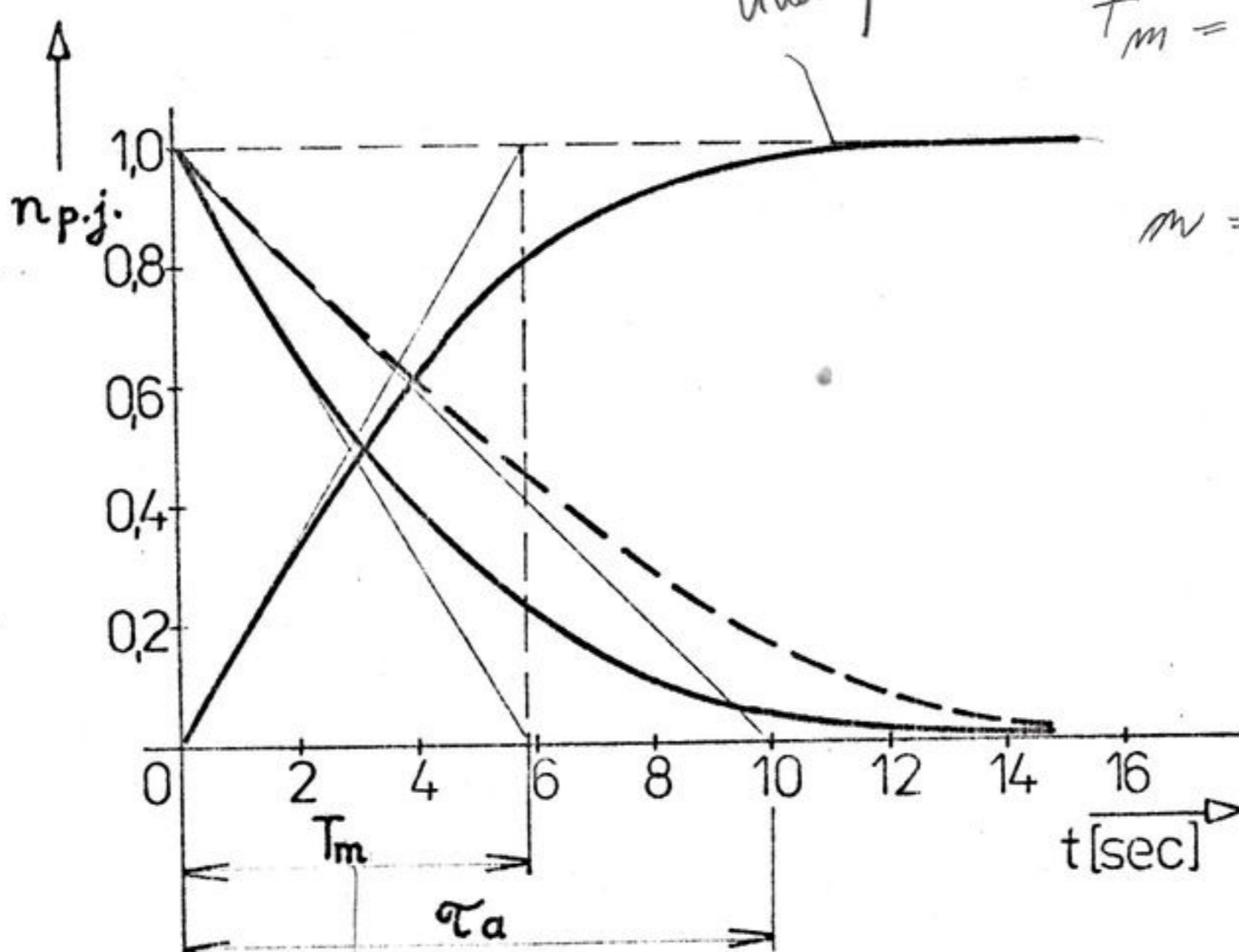
$$\begin{aligned} T_m &= \frac{J\omega_s}{M_n} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{2\pi n_s}{60} \cdot \frac{1}{M_n} \\ &= \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_s}{M_n} = \frac{GD^2 \cdot n_s}{375} \cdot \frac{\omega_n}{P_n} = \\ &= \frac{GD^2 \cdot n_s}{60 P_n} \cdot \frac{2\pi n_n}{37,2 P_n} \end{aligned} \quad \left[\text{s}; \text{Nm}^2; \text{ot/min}; \text{V} \right] \quad (1.12)$$

Mechanickou časovou konstantu T_m lze určit z křivky doběhu soustrojí v tom případě, kdy neznáme moment setrvačnosti J nebo setrvačný moment GD^2 .

Je dána úsečkou, kterou vytne na ose času tečna k doběhové křivce vedená z bodu $n_{p.j}=1$. Tento předpoklad platí, jestliže soustrojí pracovalo se jmenovitým momentem.

V případě, že soustrojí pracuje v okamžiku vypnutí s momentem $M \neq M_n$ je nutno mechanickou časovou konstantu přepočítat.

Příklad je znázorněn na obr. 1.38



$$T_m = \zeta_a \cdot \omega = \zeta_a \cdot \frac{P}{M} = \zeta_a \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \frac{P_n}{M_n}$$

$$\omega = \frac{M}{M_n} \quad ; \quad \zeta_a = \frac{P}{P_n}$$

$$M = M_n$$

obr. 1.38 Postup při určení mechanické časové konstanty

Momentová charakteristika elektromotoru je k dispozici od výrobce. Jinak ji lze sestavit z hodnot tří charakteristických bodů křivky. Jsou to :

- záběrový moment M_z (při $s=1$)
- jmenovitý moment M_n (při $s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s}$)
- moment zvratu M_{max}
 [při $s_{mz} = s_n (m_{max} + \sqrt{m_{max}^2 - 1})$]

kde :

s_{mz} skluz při otáčkách v bodě zvratu ;

$$m_{max} = \frac{M_{max}}{M_n}$$

s skluz asynchronního motoru

s_n skluz při jmenovitých otáčkách

V tabulce 1. je uveden příklad z výsledků měření rozběhů pohonů v konvenční elektrárně s bloky 200 MW.

Tabulka 1 - Rozběhy pohonů v elektrárně

| Pohon | P (kW) | U (kV) | I (A) | n (t/min) | U_p (kV) | I_z (A) | t (s) | I_{zn} (A) | k_n [-] |
|----------------------|-----------|-----------|----------|---------------|---------------|--------------|----------|-----------------|--------------|
| Kouřový ventilátor | 1000 | 6 | 116 | 494 | 5,8 | 585 | 6,3 | 605 | 5,21 |
| Mlýn | 700 | 6 | 83,2 | 1480 | 5,85 | 330 | 41,5 | 338 | 4,06 |
| Vzduchový ventilátor | 1000 | 6 | 123 | 741 | 5,8 | 530 | 5,5 | 548 | 4,45 |
| Chladicí čerpadlo | 2000 | 6 | 245 | 423 | 5,7 | 1018 | 1,5 | 1070 | 4,37 |
| Elektronapaječka | 4250 | 6 | 490 | 2980 | 5,6 | 2500 | 3,1 | 2680 | 5,47 |

V tabulce 1 značí :

U_p napětí po zapnutí motoru ($t = 0,1s$)

I_z rozběhový proud

t doba rozběhu

I_{zn} přepočtený rozběhový proud na U_n

k_n rozběhový proud I_{zn} jako násobek I_n

Vliv krátkodobé ztráty napětí nebo poklesu napětí na provoz asynchronních motorů

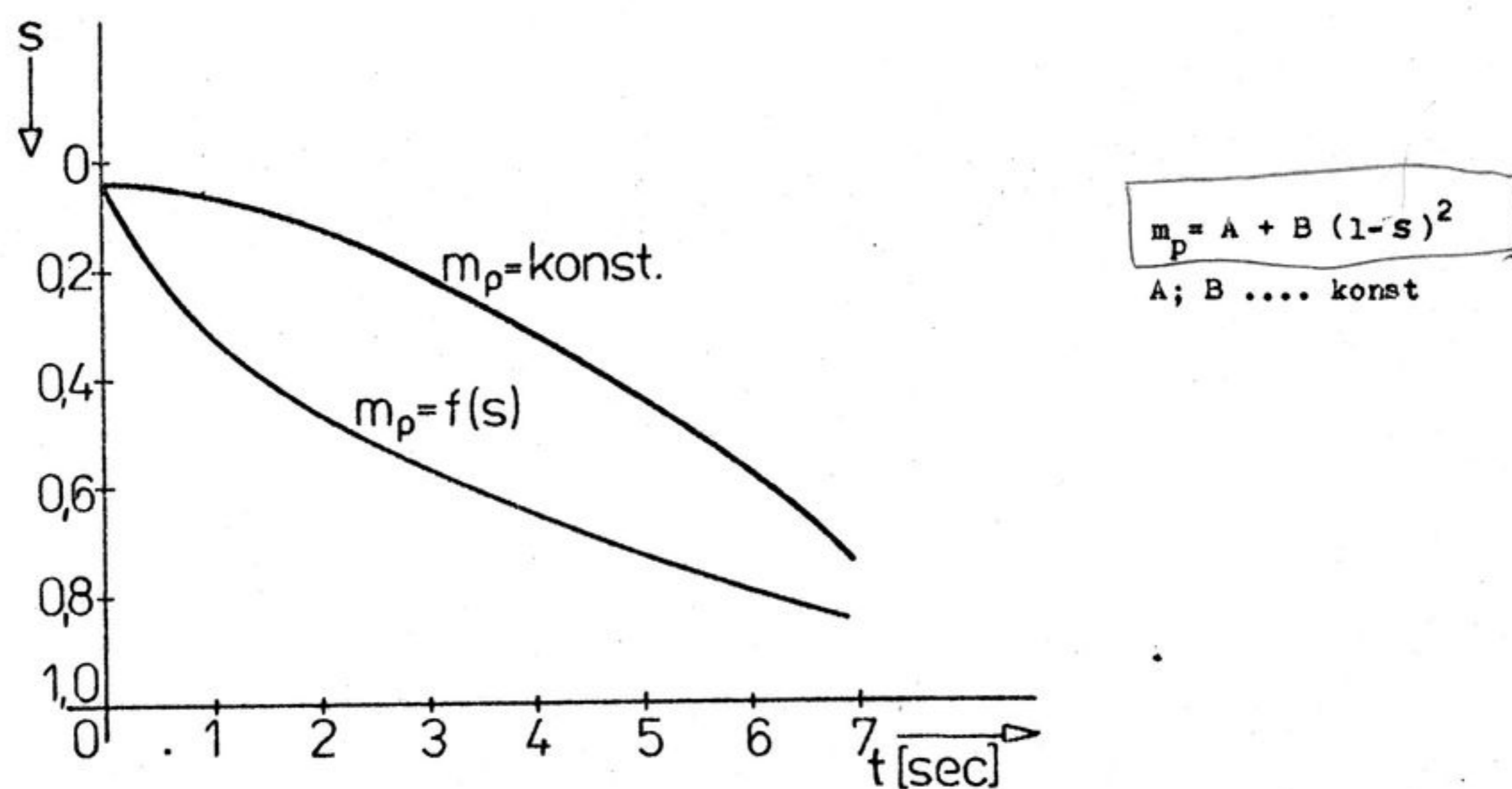
Chod motorů ve vlastní spotřebě elektráren je nepříznivě ovlivněn krátkodobými poklesy napětí v elektrickém rozvodu. Pokles napětí může být způsoben zkratem, nebo může dojít ke krátkodobému přerušení dodávky elektrické energie.

Pokles napětí při zkratu je nepřímo úměrný elektrické vzdálenosti místa zkratu od uvažovaného místa sítě. Při elektricky blízkých zkratech dojde k hlubokému poklesu napětí, při zkratech elektricky vzdálených bude pokles napětí neopak malý. Při podstatném poklesu napětí se sníží moment motoru s kvadrátem napětí, zvýší se proud

odebíraný ze sítě (zhruba úměrně s poklesem napětí) a elektromotor bude pracovat s horším účinníkem. Motor se začne přibrzďovat podle stavu určeného zatěžovací charakteristikou a momentovou charakteristikou při sníženém napětí. Při velkém a déletrvajícím poklesu napětí se může motor dokonce zastavit. Intenzivní brzdění elektromotoru nastává samozřejmě i při úplné ztrátě napětí.

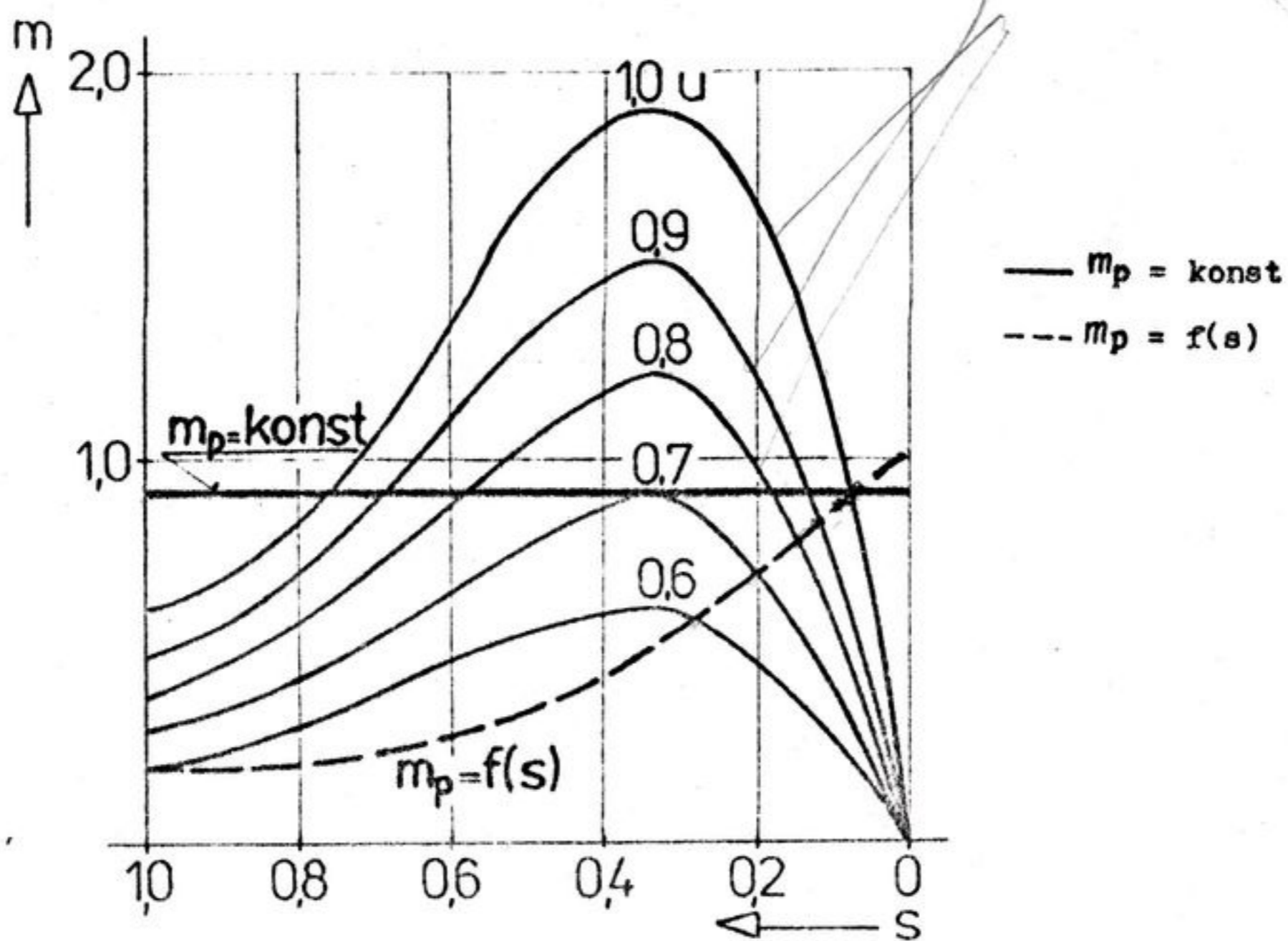
Snížení napětí na přípojnicích rozvodu vlastní spotřeby má tedy nepříznivý dopad pro provoz elektromotorů ve zvýšeném odběru proudu a tím i zvýšení oteplení vinutí statoru, dále ve zvětšeném odběru jalového výkonu a zvětšení úbytku napětí změnou pracovního režimu elektromotorů při původním poklesu napětí.

Doběhové charakteristiky jsou dány druhem zátěže. Vliv charakteru zatížení na doběh soustrojí je znázorněn na obr. 1.39, kde je znázorněn doběh pro zařízení



obr. 1.39

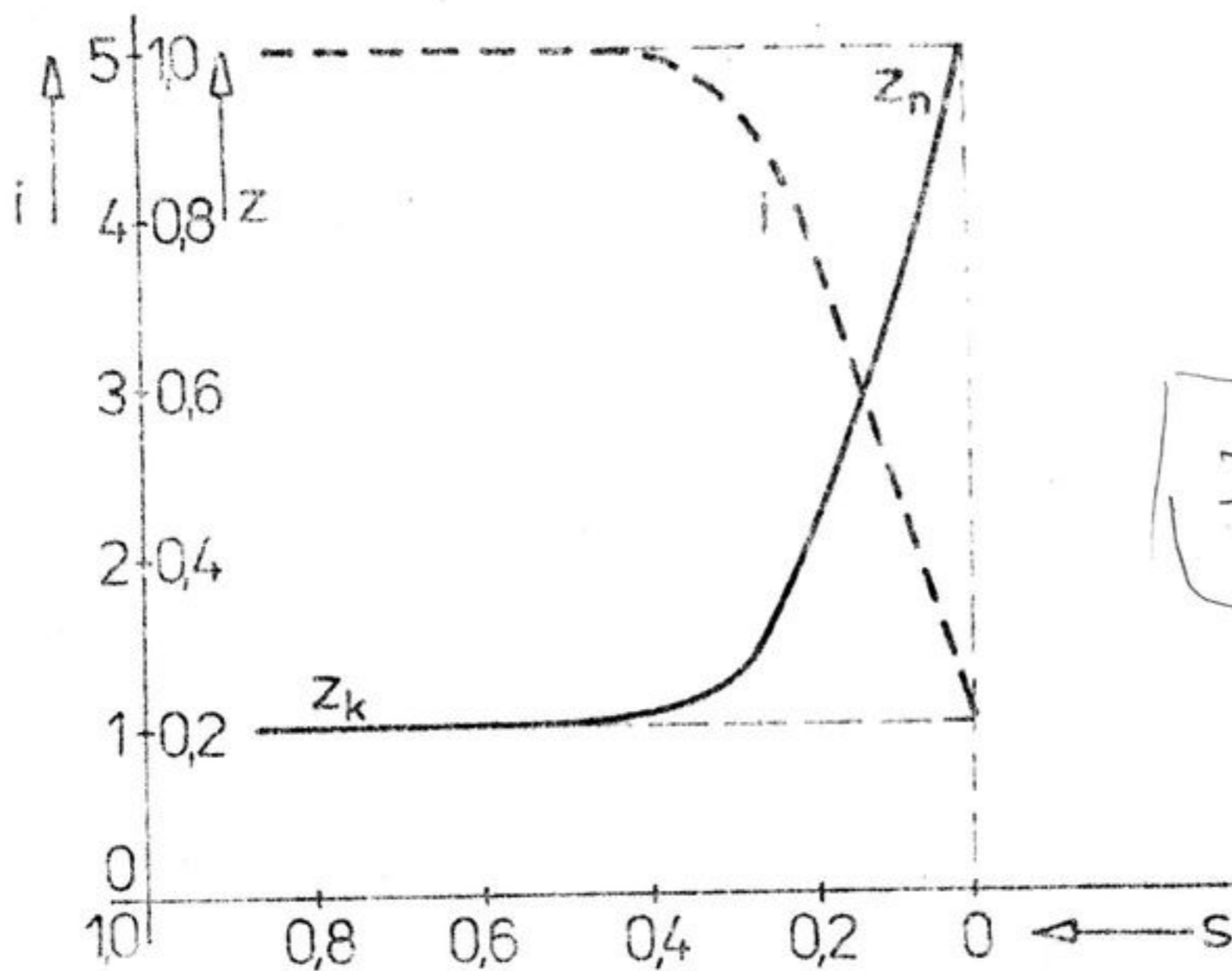
Doběhová charakteristika s konstantním momentem zatížení a doběh soustrojí s momentem závislým na otáčkách.



obr. 1.40 Závislost momentu na napětí

Na obr. 1.40 je znázorněna závislost momentu na napětí na svorkách motoru $m = m_n \cdot u^2$. Dále je na obr. 1.40 vyznačena charakteristika pro zatížení konstantní $m_p = \text{konst}$ a charakteristika zatížení s momentem, který se mění v závislosti na otáčkách $m_p = f(s)$. Je zřejmé, že při změně (poklesu) napětí na svorkách motoru dochází k přesunutí pracovního bodu podle podmínky $m_m = m_p$ (moment motoru se rovná momentu zatížení).

Při obnovení plného napětí na svorkách motorů dochází k tomu, že elektromotory začnou odebírat zvýšený proud a obnovené napětí se sníží. Zvětšení proudu elektromotorů je dáno zvětšením skluzu v době poklesu napětí nebo jeho výpadku a následném přibrzdění soustrojí. Stačí malý pokles otáček a proudy elektromotorů dosahují značných hodnot, neboť impedance motoru je závislá na velikosti skluzu, jak je naznačeno na obr. 1.41.



$$R = \frac{U}{I}$$

$$Z = \frac{U}{I_n}$$

$$Z = 0,2 Z_n$$

$$I = \frac{U}{Z}$$

obr. 1.41

Závislost impedance motoru na skluzu

I při nepatrném zvýšení skluzu klesá značně impedance motoru a je téměř rovna impedance motoru nakrátko v poměrně širokých mezích. Přitom je důležitým faktem, že při hlubokém poklesu napětí (například při blízkém zkratu) se budou asynchronní motory chovat stejně jako při úplné ztrátě napětí budeme-li sledovat jejich chování po obnovení napětí.

1.5.7 Chránění asynchronních motorů vn

Na asynchronní motory instalované v provozu elektráren jsou kladeny vysoké požadavky z hlediska spolehlivosti, neboť ekonomické ztráty způsobené výpadkem elektromotoru mohou být značné a mohou i několikanásobně překročit cenu vlastního elektromotoru. Při nedostatečné pohotovosti záloh mohou vznikat v provozu elektráren obtíže při zajištění nepřetržitého chodu technologického procesu. Proto mají elektrické ochrany pracovat tak, aby se omezil počet neopodstatněných vypnutí motorů vn a dosáhlo se optimálního využití motorů při provozu.

Podle stávajících norem se asynchronní motory vn chrání nadproudovou ochranou s mžikovým zkratovým článkem s charakteristikou nezávislou a článkem, který chrání stroj v oblasti nad jmenovitým proudem proti přetížení a má obvykle charakteristiku závislou. U větších motorů se jmenovitým výkonem nad 2 MW instalujeme zpravidla rozdílovou ochranu, která chrání motor při vnitřních zkratech na vinutí. Asynchronní motory s velkým momentem setrvačnosti se mohou vybavit také zpětnou wattovou ochranou. U motorů, kde je nebezpečí přetížení vlivem nesymetrie napájecí sítě (přerušení jedné fáze) instalujeme ochranu proti nesymetrii .

Asynchronní motory, které pracují v exponovaných provozech s obtížnými pracovními podmínkami jsou vybaveny ochranou teploty ložisek.

Výrobce ochran v ČSSR řeší ochrany asynchronních motorů v systému ALOX. Stupňová ochrana pro motory, které pracují se stálou technologickou zátěží, pracuje se dvěma velmi přesnými stupni nařizenými na 105 % I_n v prvním stupni i na 110 % I_n až 120 % I_n ve druhém stupni. Odpovídající časové nastavení se pohybuje od 60s do 300 s. Pro kontrolu rozběhu systém obsahuje nadproudový článek nastavitelný v rozsahu od 0,75 do 5,4 I_n kombinovaný s časovým, který lze nastavit od 6s do 30s.

Zkratové poruchy jsou indikovány zkratovým článkem s proudovým nastavením $4,5 \div 12 I_n$ a časovým působením ve stupních 50; 100; 150; 200 ms.

Ochrana typu ALOX chrání motor při těchto stavech :

- 1/ Rozběh motoru, kdy podmínky chlazení jsou jiné než při normálním chodu.
- 2/ Zkrat na přívodu k motoru. Ochrana musí odlišit rozběhové proudy, které dosahují hodnot obvykle od 5 do 8 I_n od proudů zkratových.
- 3/ Přetížení motoru v oblasti od 105 % do 150 % I_n je určeno působností tepelných modelů. Požadavek sledování zvýšeného oteplení vinutí vyplývá z rozboru závislosti životnosti izolace vinutí motoru na jeho teplotě, která je závislá na zatížení nebo přetížení motoru.

Tepelný model obsahuje kvadrátor, který realizuje I^2 aproximací lineárními úseky. Chyba aproximace se projeví jako $\Delta \vartheta$ v ustáleném stavu od ideálního kvadratického průběhu a jako časová chyba od teoretických závislostí působení ochran při oteplování a odpadu při ochlazování.

Tepelný model aproximuje závislost :

$$\frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_n} = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \left[1 - p e^{-\frac{t}{\tau_1}} - (1-p) e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right] \quad (1.13)$$

kde

- $\Delta \vartheta_n$... ustálené oteplení při jmenovitém proudu motoru
 τ_1 ... první časová konstanta nastavitelná v rozmezí od 1 do 15 minut
 τ_2 ... druhá časová konstanta, nastavitelná v rozmezí od 10 do 150 minut
 p ... parametr, který lze nastavit ve stupních od 0 do 1,0 podle typu a provedení motoru

Působení ochrany v ustáleném stavu je odvozené od velikosti celkového oteplení :

$$\vartheta = \Delta \vartheta + \vartheta_e$$

kde ϑ_e je vnější teplota, resp. teplota statoru stroje

časové působení ochrany :

$$t = \tau_{ot} I_n \frac{\Delta \vartheta_n - \Delta \vartheta_0}{\Delta \vartheta_n - (\vartheta_{nast1} - \vartheta_e)} \quad (1.14)$$

kde τ_{ot} ... oteplovací časová konstanta

Δv_0^p .. počáteční tepelný stav

$v_{nast.1}^p$ nastavení asymptoty ochrany (od 100 do 200%)

Po vypnutí motoru nastává jeho ochlazování a ochrana odpadá při poklesu oteplení

$v = v_{nast.2}^p$ podle časové závislosti

$$t = \tau_{och} \ln \frac{v_{nast.1}^p - v_e^p}{v_{nast.2}^p - v_e^p} \quad (1.15)$$

τ_{och} ochlazovací časová konstanta při vypnutém motoru

$$\tau_{och} = k \tau_{ot}, \quad k - \text{lze nastavit ve stupních od 1 do 6}$$

Volbou $v_{nast.2}^p$ lze nastavit blokovací dobu proti novému zapnutí motoru.

1.5.6. Volba napětí vlastní spotřeby elektrické energie

Ve vlastní spotřebě elektráren volíme v našich čs. podmínkách dvě napěťové soustavy :

- pro rozvod vn soustavu 6 kV s izolovaným uzlem
- pro rozvod nn soustavu 380/220 V s pracovním nulovým vodičem.

V některých odůvodněných případech, zejména při napájení vzdálených objektů lze navrhnout soustavu 500 V s izolovaným uzlem.

Při návrhu zařízení elektrické části vlastní spotřeby elektrárny je třeba respektovat zachování dovolených tolerancí napětí od jmenovité hodnoty. Maximální přípustná odchylka napětí je $\pm 5\%$, vyjímečně lze připustit odchylku $+ 10\%$, poklesy pod $- 5\%$ lze připustit pouze v podružném rozvodu nn.

Růst jednotkových výkonů elektrárenských bloků je provázen vzrůstajícím výkonem elektrických pohonů. Při zachování dosavadních napěťových hladin 380/220 V, 6 kV v elektrárnách budou při dalším zvětšování výkonů stoupat energetické ztráty v rozvodu. Zabránit zvětšujícím se úbytkům napětí a ztrátovému výkonu je možné použitím vyššího provozního napětí. Jako optimální se ustálilo nové napětí 660 V, které je doporučeno IEC, RVHP a některými státními normami. Výhody (nižší pořizovací a provozní náklady) této napěťové hladiny lze shrnout takto :

- zmenšení průřezu kabelů o 1 až 2 stupně a snížení ztrát v rozvodu oproti provozu při napětí 380 V,
 - možnost připojení transformátoru s výkonem o 1 stupeň vyšším při nezměněném zkratovém proudu nebo snížení zkratového proudu při stejném výkonu transformátoru (hranice výkonů při napětí 660 V se zvyšuje na 2500 kVA),
 - možnost připojit na napětí 660 V motory do výkonu 400 ÷ 500 kW, což vede ke snížení pořizovacích nákladů. Prostorové nároky na rozvodny se sníží až na 60 %.
- Napětí 660 V bylo již v některých zemích zavedeno.

V SSSR částečně realizován rozvod 660 V v uhelných a rudných dolech, toto napětí je zavedeno v Anglii a NDR. Z oblastí elektrárenství byl realizován rozvod 660 V v jaderných elektrárnách v NSR.

U velmi velkých elektrárenských bloků se napěťová hladina 6 kV stává kritickou (z důvodů zkratového výkonu zdroje). Napájení asynchronních motorů s kotvou nakrátko při výkonech přesahujících 8 MW je vzhledem k potřebnému zkratovému výkonu zdroje, který se projeví poklesem napětí při spouštění obtížně řešitelné napětím 6 kV. V těchto případech, zvláště při větším počtu takových pohonů je výhodnější rozvod 10 kV. Podle zahraničních zkušeností by mezní blokový výkon pro napětí 6 kV měl být asi 800 MW. Této napěťové hladiny je např. použito v NSR pro velké jaderné bloky, v USA se používá 13,8 kV, v Anglii 11 kV.

1.5.7. Kontrola navrženého výkonu zdrojů elektrické energie ve vlastní spotřebě elektráren

Výkon pracovních zdrojů elektrické energie ve vlastní spotřebě elektráren se určuje z celkového příkonu všech elektrických spotřebičů, které jsou v chodu při zajištění jmenovitého výkonu technologického zařízení.

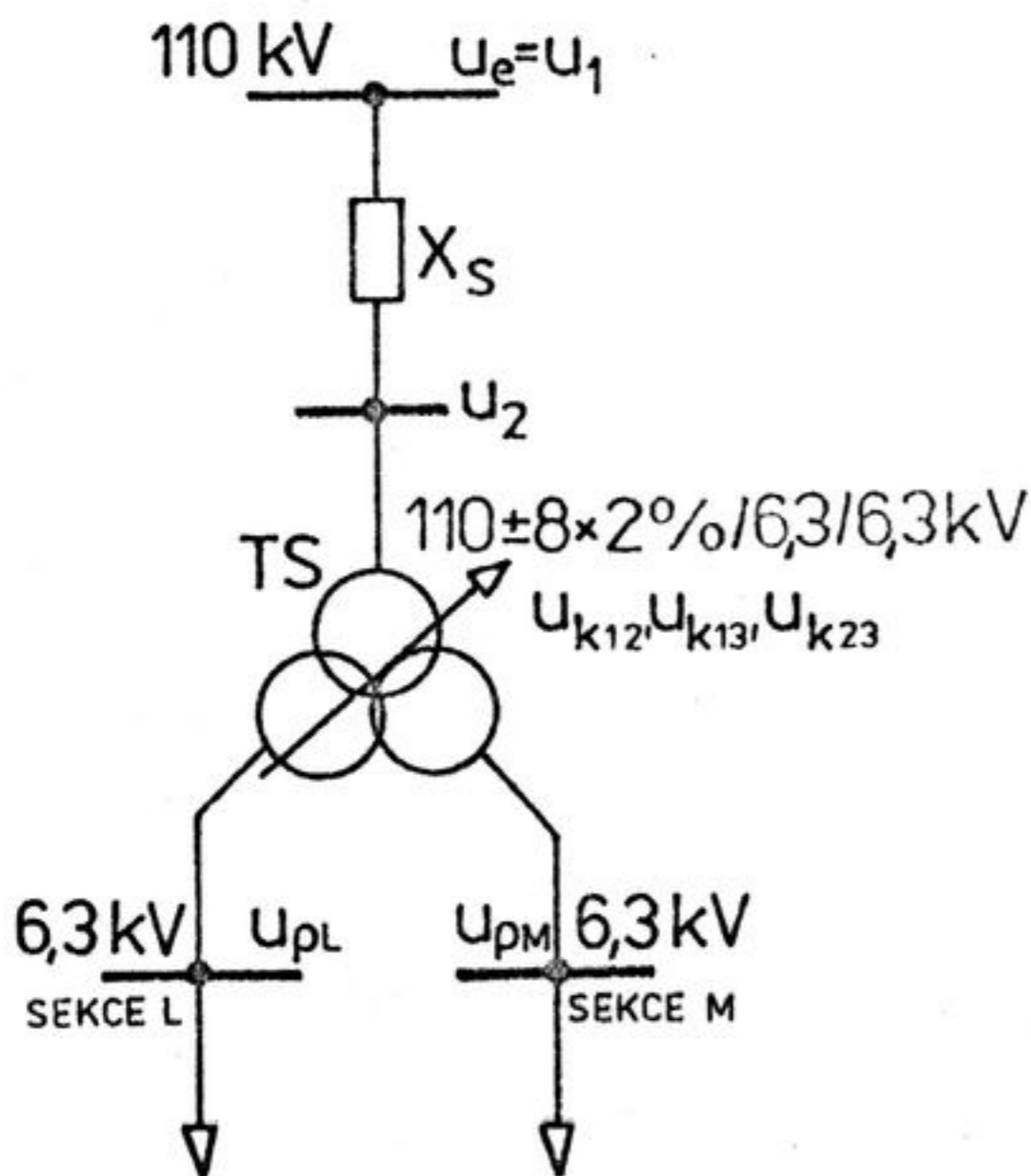
Takto stanovený výkon zdrojů je nutno kontrolovat, zda vyhoví i při spouštění jednotlivých elektromotorů nebo při samonajíždění celých skupin motorů.

Kontrola se provádí na :

- krátkodobou přetížitelnost zdrojů,
- napěťové poměry při spouštění největšího motoru nebo při samonajíždění skupiny elektromotorů, přičemž se zároveň určuje vhodný převod transformátoru,
- posouzení správného nastavení a funkce ochran zdroje i rozvodu elektrické energie ve vlastní spotřebě při normálním, provozním zapojení zdrojů nebo při zapojení na rezervní zdroje. Návrh nastavení ochran musí respektovat i mimořádné provozní strany jako jsou například těžké, dlouhodobé rozběhy motorů nebo samonajíždění, změny parametrů napájecího napětí a podobně.

Způsob kontroly navrženého systému napájení vlastní spotřeby je uveden na typickém případě, který je znázorněn na obr. 1.42.

Třívlnuťový regulační transformátor TS slouží jako najížděcí nebo záložní zdroj vlastní spotřeby elektrické energie, který je napájen ze sítě 110 kV, jmenovité napětí na sekundární straně je 6,3 kV.



$$S_{KS} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot X_c}$$

$$I_{KS} = \frac{I_N}{\sqrt{3} \cdot X_c}$$

$$X = \frac{U_e}{\sqrt{3} \cdot I_{KS}}$$

$$I_{KS} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot X}$$

$$S_{KS} = \frac{U_N \cdot I_{KS}}{\sqrt{3}}$$

$$S_{KS} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot X_c}$$

$$I_{KS} = \frac{S_{KS}}{\sqrt{3} \cdot U_2}$$

Obr. 1.42. Schema zapojení vlastní spotřeby pro výpočet

- Na obr. 1.42. značí :
- u_e ... napětí zdroje
 - u_2 ... napětí na primárních svorkách transformátoru
 - S_{ks} ... zkratový výkon napájecí sítě
 - S_n ... jmenovitý výkon transformátoru TS
 - u_{k12}
 - u_{k13} } ... napětí nakrátko mezi vinutími transformátoru TS
 - u_{k23} }
 - u_{pL} ... napětí na přípojnících sekce L
 - u_{pM} ... napětí na přípojnících sekce M

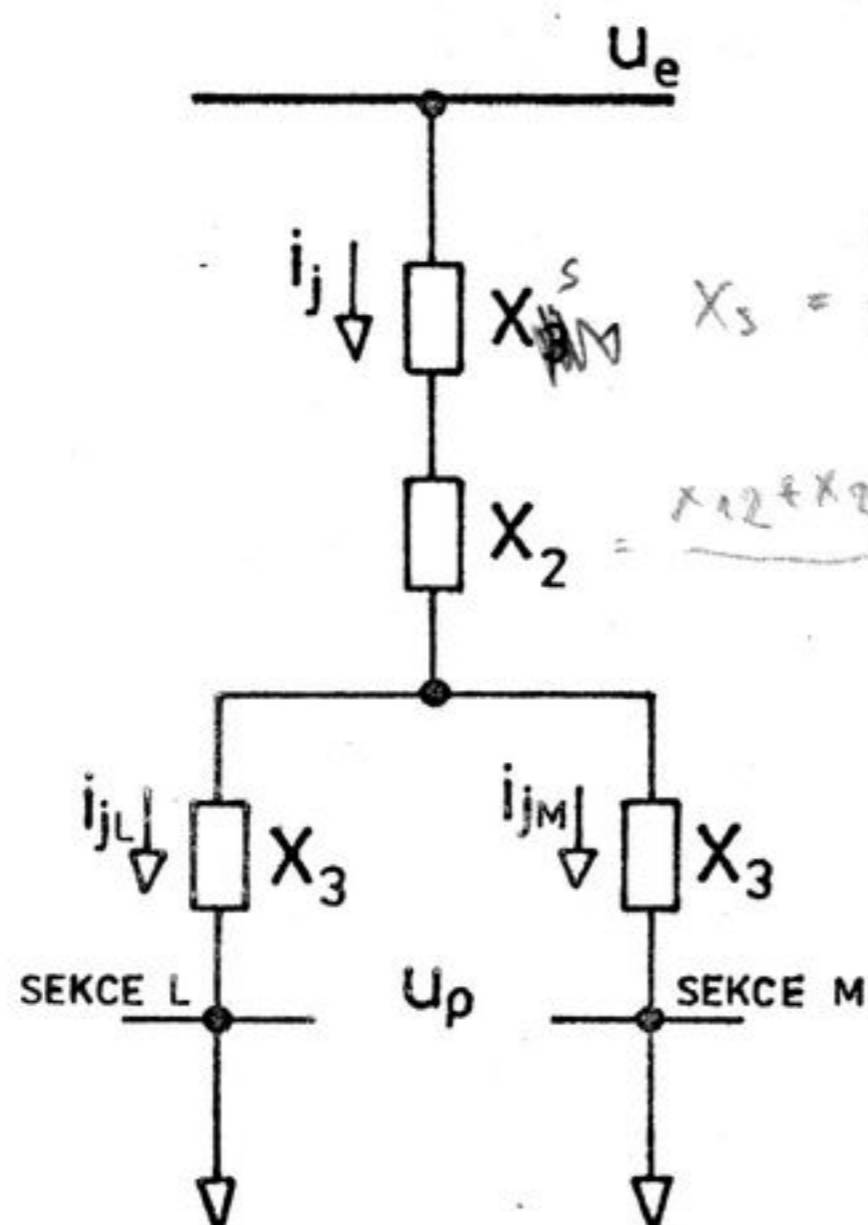
Nejdříve určíme vhodný převod transformátoru TS při maximálním odběru vlastní spotřeby. Při výpočtu uvažujeme pouze reaktance jednotlivých prvků soustavy. Náhradní schéma zapojení je na obr. 1.43, kde značí :

i_j ... jalová složka proudu celkového zatížení transformátoru TS

i_{jL} .. jalová složka proudu v sekci L

i_{jM} .. jalová složka proudu v sekci M

Všechny uvedené veličiny jsou v poměrných jednotkách.



Handwritten notes:

$$X_s = \frac{u_e \cdot u_e}{\sqrt{3} I_{kS}} \quad \text{vztažné}$$

$$X_2 = \frac{X_{12} + X_{23} - X_{13}}{2}$$

$$X_{1\%} = X_s \cdot \frac{S_{\text{transformátoru}}}{(p \cdot U_e)^2}$$

$$X_{0\%} = X \cdot \frac{S_u}{U_e^2}$$

Obr. 1. 43. Náhradní schéma

Přepočet reaktancí trojvinitového transformátoru provedeme podle těchto vztahů :

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{X_{12} + X_{13} - X_{23}}{2} \\ X_2 &= \frac{X_{12} + X_{23} - X_{13}}{2} \\ X_3 &= \frac{X_{13} + X_{23} - X_{12}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

Náhradní reaktance sítě :

$$X_S = \frac{u_e}{\sqrt{3} I_{kS}} = \frac{u_e \cdot u_v}{S_{kS}} \quad (1.17)$$

kde : u_e ... napětí napájecí sítě [kV]
 u_v ... vztažné napětí [kV]
 I_{kS} ... souměrný zkratový proud [kA]

Náhradní reaktance sítě s respektováním převodu transformátoru :

$$X_{1\%} = X_S \cdot \frac{S_V}{(p \cdot U_V)^2} \quad (1.18)$$

kde :

S_V ... vztažený výkon [MVA]

p ... převod transformátoru

$$X_{\%} = X \cdot \frac{\sqrt{3} I_N}{U_N} = X \cdot \frac{S_N}{U_N^2}$$

Poměrná hodnota napětí zdroje :

$$u_e = \frac{U_e}{p \cdot U_V}$$

Jalová složka proudu v sekci L :

$$i_{jL} = \frac{Q_L}{u_p} = \frac{Q_L}{S_V u_p}$$

kde :

Q_L ... poměrná hodnota jalového zatížení v sekci L

Q_L ... jalové zatížení v sekci L [MVA_r]

Pro zjednodušení situace ve výpočtu budeme předpokládat, že napětí na obou sekcích L a M budou shodná :

$$u_{pL} = u_{pM} = u_p$$

Celkový jalový proud :

$$i_j = i_{jL} + i_{jM} = \frac{Q_L + Q_M}{u_p} \quad (1.19)$$

Napětí zdroje bude podle náhradního schéma vyjádřeno :

$$u_e = (X_1 + X_2) i_j + i_{jL} X_3 + u_p \quad (1.20)$$

Po úpravě :

$$\frac{U_e}{p U_V} - X_S \cdot \frac{S_V}{p^2 U_V^2} \cdot i_j - X_2 i_j - X_3 i_{jL} = u_p / p^2$$

Další úpravou dostaneme :

$$(X_2 i_j + X_3 i_{jL} + u_p) \cdot p^2 - \frac{U_e}{U_V} \cdot p + X_S \frac{S_V}{U_V^2} \cdot i_j = 0 \quad (1.21)$$

Do této rovnice dosadíme konkrétní hodnoty řešeného případu a vypočítáme potřebný převod.

Kontrola navržených parametrů zdrojů elektrické energie ve vlastní spotřebě elektráren při přechodných stavech

Při řešení přechodných stavů budeme uvažovat tyto dva základní případy :

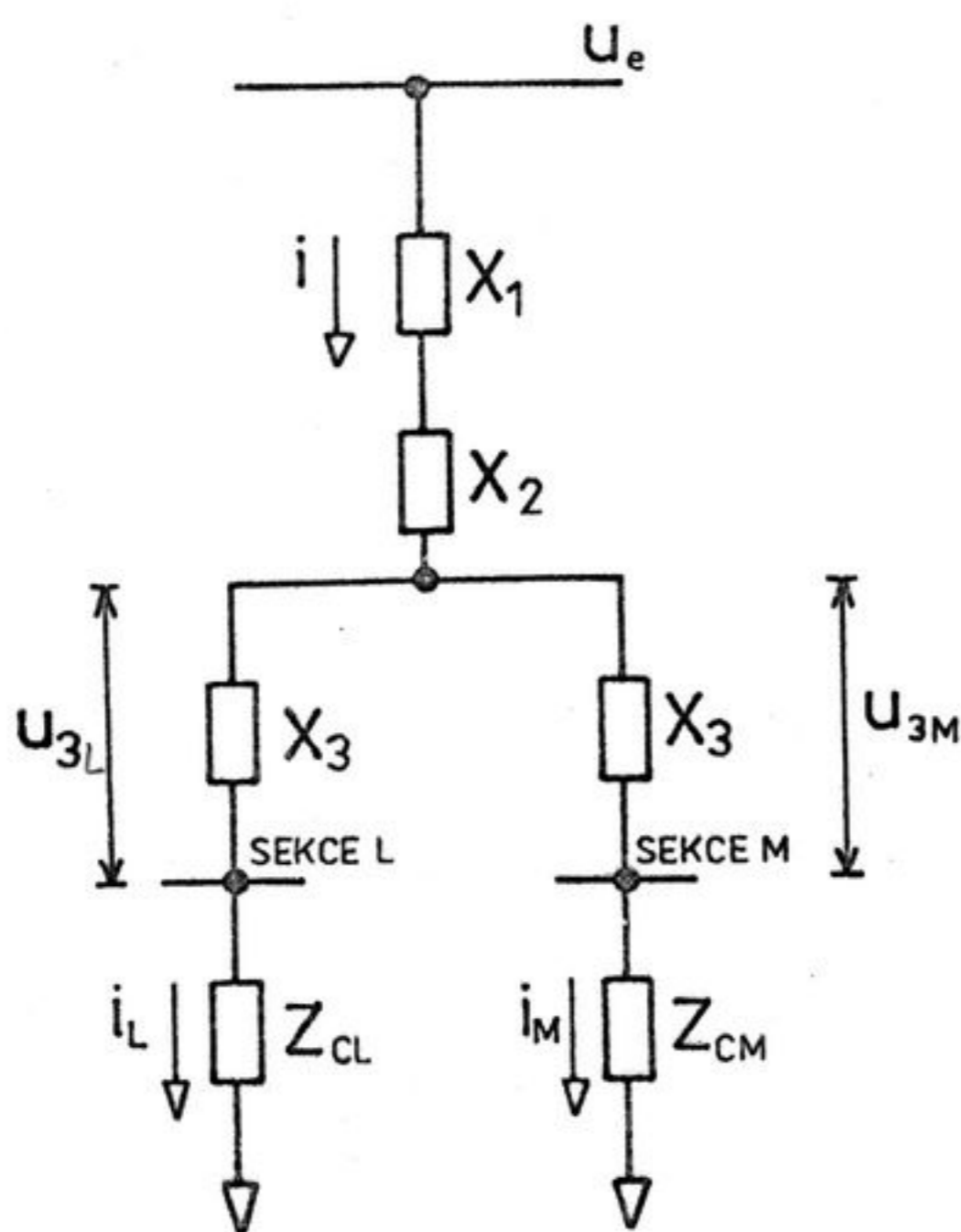
- a/ spouštění největšího motoru
- b/ samonajíždění

Postup řešení, který je dále uveden respektuje činné a induktivní odpory jednotlivých prvků soustavy. Vycházíme ze stejné situace systému napájení vlastní spotřeby, kdy uvažujeme regulační transformátor TS jako záložní nebo najížděcí zdroj.

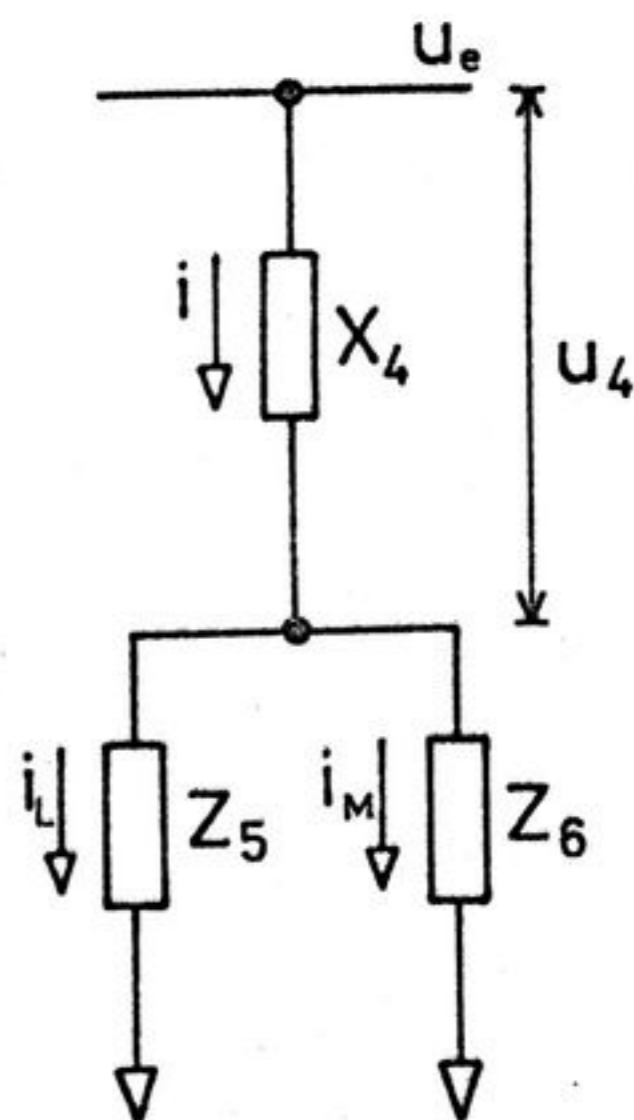
Pro provoz spotřebičů ve vlastní spotřebě je třeba zajistit tyto podmínky :

- napětí na svorkách elektromotorů musí být dle ČSN 381120 v ustáleném chodu v rozmezí $U_n \pm 5\%$,
- při spouštění největšího motoru nemá napětí klesnout pod hodnotu $0,85 U_n$, nesmí však klesnout pod hodnotu $0,80 U_n$,
- při samonajíždění skupiny elektromotorů nemá počáteční hodnota napětí klesnout pod $0,65 U_n$.

Napěťové poměry budou kontrolovány na blokové rozvodně 6 kV na sekcích L a M podle náhradního schéma, které respektuje stejnou situaci jako v předcházejícím případě .



Obr. 1.44. Náhradní schéma
Napájení vlastní spotřeby



Obr. 1.45. Upravené náhradní schéma

Označení je schodné jako v předcházejícím případě kde :

- X_1 ... náhradní reaktance soustavy
- $X_2; X_3$.. přepočtené reaktance transformátoru TS
- $Z_{cL}; Z_{cM}$.. náhradní impedance zátěže

Podle upraveného nébréděho schema jsou impedance :

$$z_5 = z_{CL} + jX_3 = r_{CL} + j(X_{CL} + X_3) = r_5 + jX_5$$

$$z_6 = z_{CM} + jX_3 = r_{CM} + j(X_{CM} + X_3) = r_6 + jX_6$$

Napětí napájecí sítě:

$$u_e = jX_4 (i_L + i_M) + i_M z_6 \quad (1.22)$$

$$u_e = jX_4 (i_L + i_M) + i_L z_5 \quad (1.23)$$

Z předchozích vztahů vyplývá:

$$z_5 i_L = z_6 i_M \quad (1.24)$$

Ze vztahu (1.24) určíme proudy v sekcích L a M:

$$i_L = \frac{z_6}{z_5} i_M \quad (1.25)$$

$$i_M = \frac{z_5}{z_6} i_L \quad (1.26)$$

Ze vztahů (1.22) a (1.23) určíme proudy v sekcích L a M:

$$i_L = \frac{u_e}{jX_4 + jX_4 \frac{z_5}{z_6} + z_5} = \frac{u_e}{z_L} = \frac{u_e}{r_L + jX_L} = \frac{u_e}{r_L^2 + X_L^2} (r_L - jX_L) = \frac{i_{LC} - j i_{Lj}}{\quad} \quad (1.27)$$

$$i_M = \frac{u_e}{jX_4 + jX_4 \frac{z_6}{z_5} + z_6} = \frac{u_e}{z_M} = \frac{u_e}{r_M + jX_M} = \frac{u_e}{r_M^2 + X_M^2} (r_M - jX_M) = \frac{i_{MC} - j i_{Mj}}{\quad} \quad (1.28)$$

Impedance ve větvi L:

$$z_L = jX_4 + jX_4 \frac{r_5 + jX_5}{r_6 + jX_6} + r_5 + jX_5 = r_5 + \frac{X_4 X_6 r_5 - X_4 X_5 r_6}{r_6^2 + X_6^2} + j \left(\frac{X_4 r_5 r_6 + X_4 X_5 X_6}{r_6^2 + X_6^2} + X_4 + X_5 \right) \quad (1.29)$$

Ohmický odpor větve L:

$$r_L = \frac{X_4 X_6 r_5 - X_4 X_5 r_6}{r_6^2 + X_6^2} + r_5 \quad (1.30)$$

Induktivní odpor větve L :

$$X_L = \frac{X_4 r_5 r_6 + X_4 X_5 X_6}{r_6^2 + X_6^2} + X_4 + X_5 \quad (1.31)$$

Impedance ve větvi M :

$$\begin{aligned} Z_M &= jX_4 + jX_4 \frac{r_6 + jX_6}{r_5 + jX_5} + r_6 + jX_6 = \\ &= \frac{X_4 X_5 r_6 - X_4 X_6 r_5}{r_5^2 + X_5^2} + r_6 + j \left(\frac{X_4 r_5 r_6 + X_4 X_5 X_6}{r_5^2 + X_5^2} + X_4 + X_6 \right) \end{aligned} \quad (1.32)$$

Ohmický odpor větve M :

$$r_M = \frac{X_4 X_5 r_6 - X_4 X_6 r_5}{r_5^2 + X_5^2} + r_6$$

Induktivní odpor větve M :

$$X_M = \frac{X_4 r_5 r_6 + X_4 X_5 X_6}{r_5^2 + X_5^2} + X_4 + X_6$$

Jalová složka proudu ve větvi L podle vztahu (1.27) :

$$i_{jL} = \frac{u_e}{X_L^2 + r_L^2} \cdot X_L \quad (1.33)$$

Jalová složka proudu ve větvi M podle vztahu (1.28) :

$$i_{jM} = \frac{u_e}{X_M^2 + r_M^2} \cdot X_M \quad (1.34)$$

Celkový jalový proud procházející transformátorem TS :

$$i_j = i_{jL} + i_{jM} \quad (1.35)$$

Poměrná hodnota napětí na přípojnicích vlastní spotřeby 6 kV sekce L :

$$u_{pL} = u_e - u_4 - u_{3L} = u_e - i_j X_4 - i_{jL} X_3 \quad (1.36)$$

Poměrná hodnota napětí na přípojnicích vlastní spotřeby 6 kV sekce M :

$$u_{pM} = u_e - u_4 - u_{3M} = u_e - i_j X_4 - i_{jM} X_3 \quad (1.37)$$

Určení náhradní impedance zátěže :

Ohmický odpor respektující předběžné zatížení :

$$R = \frac{P}{S^2} \cdot U_n^2 \quad (1.38)$$

Induktivní odpor respektující předběžné zatížení :

$$X = \frac{Q}{S^2} \cdot U_n^2 \quad (1.39)$$

kde : S ... zdánlivý výkon předběžného zatížení [MVA]
P ... činný výkon předběžného zatížení [MW]
Q ... jalový výkon předběžného zatížení [MVar]

Poměrná hodnota celkového odporu zátěže :

$$r_c = R \frac{S_v}{U_v^2} = P \cdot \frac{S_v}{S^2} \left(\frac{U_n}{U_v} \right)^2 \quad (1.40)$$

Poměrná hodnota celkové reaktance zátěže :

$$x_c = X \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = Q \cdot \frac{S_v}{S^2} \left(\frac{U_n}{U_v} \right)^2 \quad (1.41)$$

Zdánlivý výkon :

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1.42)$$

Pro motory v chodu jsou složky činného a jalového výkonu určeny z výpočtových (jmenovitých) hodnot :

$$P_M = P_c \text{ výp} \quad (1.43)$$

$$Q_M = Q_c \text{ výp.} \quad (1.44)$$

Pro rozbíhající se motory je třeba uvažovat změněné parametry odpovídající chodu nakrátko asynchronních motorů :

$$P_p = S_p \cos \varphi_k$$

$$Q_p = S_p \sin \varphi_k$$

$$S_p = i_k \frac{P_n}{\cos \varphi_n \eta}$$

kde : i_k ... poměrný záběrný proud motoru
 P_n ... jmenovitý výkon motoru (na hřídeli)
 $\cos \varphi_n$... účinnost motoru při jmenovitých otáčkách
 $\cos \varphi_k$... účinnost motoru při rozběhu

Při spouštění největšího motoru jsou složky činného a jalového výkonu :

$$P = P_P + P_M = P_C \text{ výp} + i_k \frac{P_n}{\cos \varphi_n \eta} \cos \varphi_k \quad (1.45)$$

$$Q = Q_P + Q_M = Q_C \text{ výp} + i_k \frac{P_n}{\cos \varphi_n \cdot \eta} \sin \varphi_k \quad (1.46)$$

Z uvedených vztahů je zřejmé, že uvažujeme současně předběžné zatížení dané odběrem všech spotřebičů v technologickém procesu a dále zatížení způsobené rozběhovým proudem největšího motoru. Důsledkem toho vzniká na přípojnicích zvětšený pokles napětí a napájecí transformátor je zatěžován celkovým proudem.

Samonajíždění

Při samonajíždění uvažujeme s rozběhem skupin motorů na obou uvažovaných přípojnicích. Hodnoty činných a jalových výkonů jsou dány součtem jednotlivých výkonů motorů, které se zúčastňují na samonajíždění:

$$P = i_k \cdot \frac{\sum P_n}{\cos \varphi_n \cdot \eta} \cos \varphi_k \quad (1.47)$$

$$Q = i_k \frac{\sum P_n}{\cos \varphi_n \eta} \cdot \sin \varphi_k \quad (1.48)$$

Ostatní hodnoty jsou uvažovány jako průměrné:

$$(i_k ; \cos \varphi_n , \cos \varphi_k ; \eta)$$

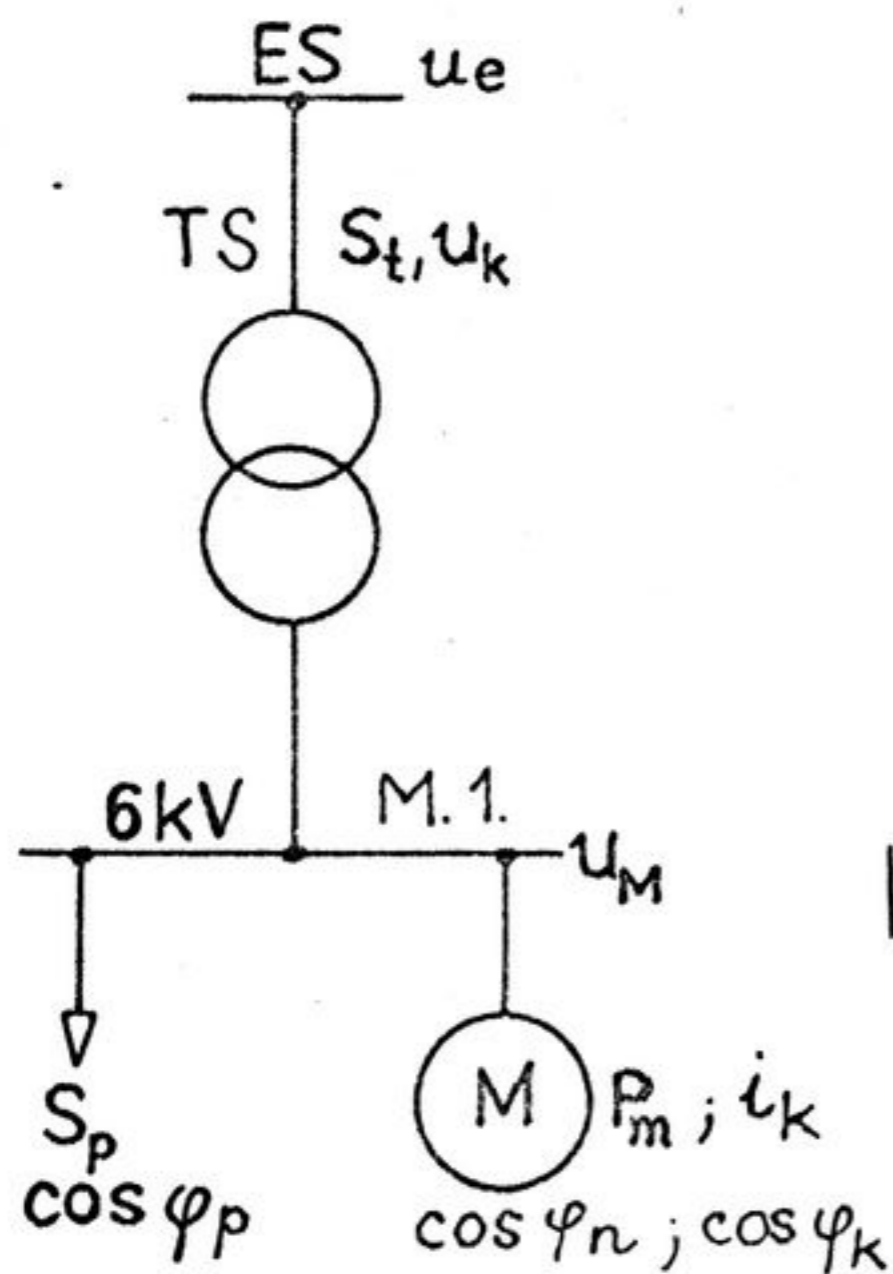
Postupy pro určení vhodného převodu transformátoru (1.21) a poměrné hodnoty napětí jsou shodné jako v předcházejících případech. Uvedená metoda dává přesné výsledky, neboť uvažuje obě složky impedance a dovoluje posoudit vhodnost navrženého transformátoru včetně jeho rozsahu regulace.

Kontrola navrženého výkonu zdrojů pomocí poměrných hodnot reaktancí při rozběhu motoru

Při tomto způsobu kontroly velikosti výkonu pracovních zdrojů neuvažujeme činný odpor jednotlivých prvků uvažované soustavy. Tento předpoklad platí pro sítě vn; u sítí nn musíme uvažovat i činný odpor.

Dále můžeme zanedbat ztráty v transformátorech a v rozvodném zařízení.

Při návrhu a kontrole výkonu pracovního zdroje vycházíme obvykle z této typické situace, kdy transformátor pro napájení vlastní spotřeby je neregulační.

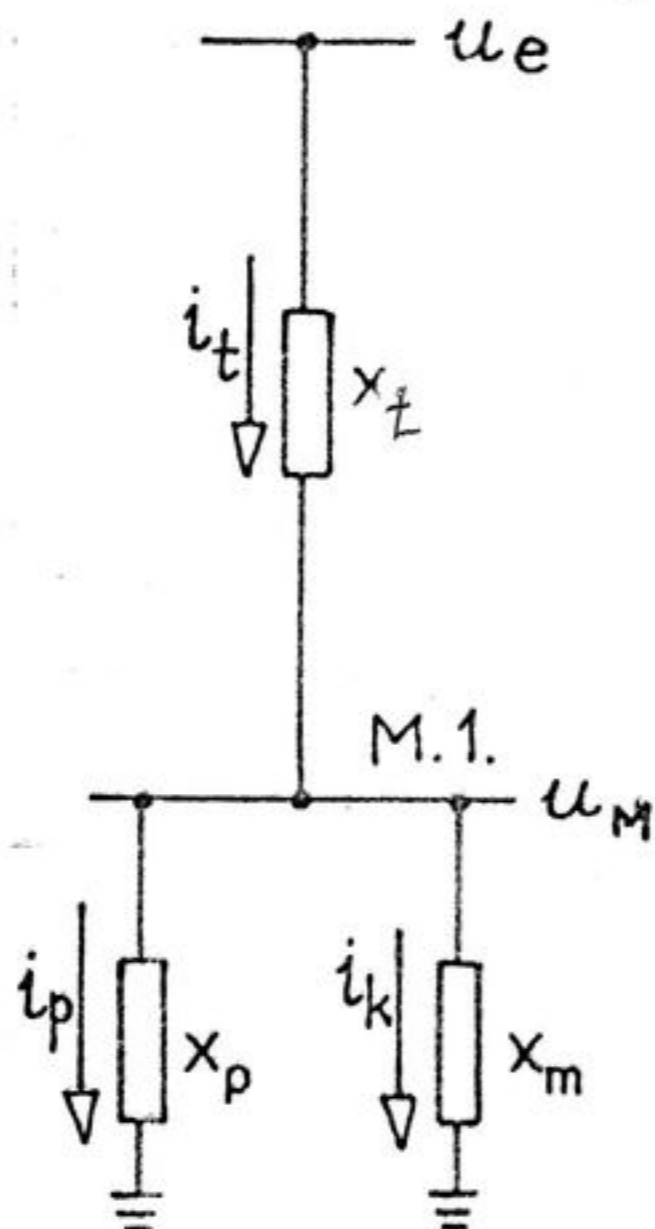


- u_e ... poměrná hodnota napětí napájecí sítě
- TS ... transformátor vlastní spotřeby (pracovní zdroj)
- S_t ... jmenovitý výkon transformátoru
- u_k ... napětí nakrátko transformátoru
- S_p ... předběžné zatížení na sledované sekci
- $\cos \varphi_p$... účinník předběžného zatížení
- M ... uvažovaný motor při rozběhu
- P_m ... jmenovitý činný výkon na hřídeli motoru
- $\cos \varphi_n$... účinník motoru při jmenovitém zatížení
- $\cos \varphi_k$... účinník motoru při rozběhu
- i_k ... násobek jmenovitého proudu při rozběhu

Obr. 1. 46. Schema pro kontrolní výpočet rozběhu

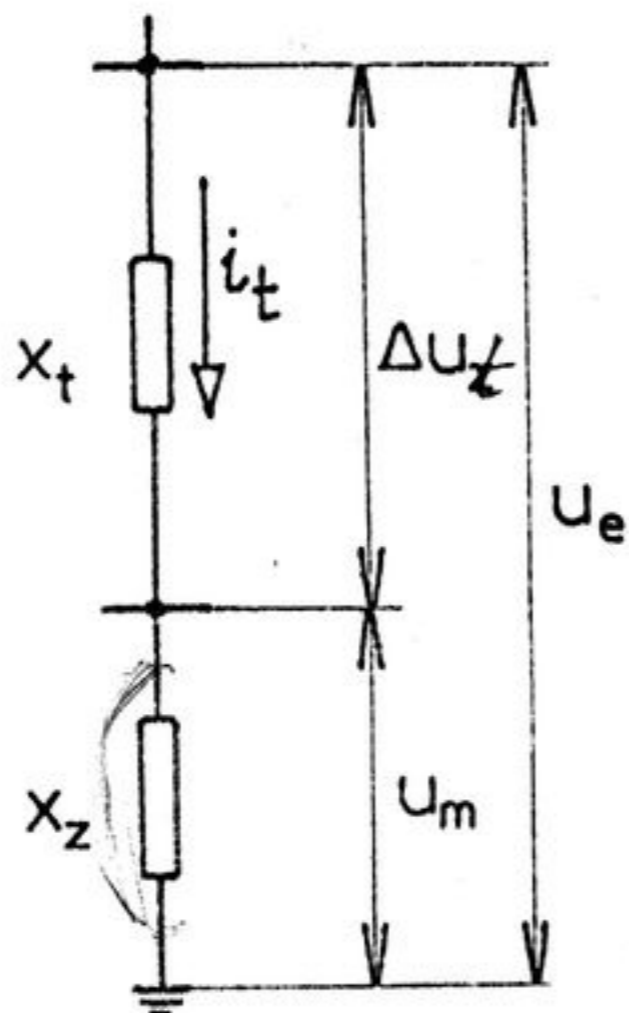
Napětí napájecí sítě u_e uvažujeme konstantní. Při rozběhu motoru uvažujeme, že se proud i_k během doby rozběhu nemění.

Náhradní schema pro danou situaci je na obr. 1. 47.



- kde :
- X_t ... náhradní reaktance transformát.
- X_p ... náhradní reaktance předběžného zatížení
- X_m ... náhradní reaktance motoru při rozběhu

Obr. 1.47. Náhradní schema pro výpočet



$$X_c = X_t + X_z$$

Obr. 1. 48. Náhradní schema pro výpočet proudových a napěťových poměrů :

V obr. 1. 48 značí :

- X_z ... náhradní reaktance celkového zatížení
- i_t ... proud transformátoru při rozběhu motoru
- ΔU_t .. úbytek napětí na transformátoru
- U_M ... napětí na přípojnících

Pro danou situaci platí :

$$\Delta U_t = U_e - U_M = i_t X_t \quad (1.22)$$

Ze vztahu (1.22) je zřejmé

$$i_t = \frac{U_e - U_M}{X_t} \quad (1.23)$$

$$X_t = \frac{U_e - U_M}{i_t} \quad (1.24)$$

Dále platí :

$$i_t = \frac{U_M}{X_z} \quad (1.25)$$

Náhradní reaktance zatížení :

$$X_z = \frac{X_p \cdot X_m}{X_p + X_m} \quad (1.26)$$

$$y_m = \frac{1}{i_k} \quad X_m = \frac{1}{i_k} \cdot \frac{V_N}{S_m} \cdot \frac{S_t}{V_N^2} = \frac{S_t}{V_N^2} \cdot \frac{1}{i_k}$$

Náhradní reaktance motoru při rozběhu :

$$X_m = \frac{1}{i_k} \cdot \frac{S_t}{S_m} \quad (1.27)$$

Pro jednoduchost volíme jako vztažný výkon jmenovitý výkon transformátoru TS .

Náhradní reaktance předběžného zatížení :

$$X_p = \frac{1}{\sin \varphi_p} \cdot \frac{S_t}{S_p} \quad (1.28)$$

Předpokládáme, že úbytek napětí na transformátoru je dán převážně jalovou složkou proudu.

Podle náhradního schéma na obr. 1.48. dále platí :

$$\frac{u_e}{u_M} = \frac{X_c}{X_z} ; \quad u_M = u_e \cdot \frac{X_z}{X_c} = u_e \cdot \frac{X_z}{X_t + X_z} \quad (1.29)$$

Podle vztahu (1.24) :

$$i_t = \frac{u_M}{X_z} = u_M \left(\frac{1}{X_p} + \frac{1}{X_m} \right)$$

$$i_t = u_M \left(\frac{S_p \sin \varphi_p}{S_t} + i_k \frac{S_m}{S_t} \right) \quad (1.30)$$

Minimální potřebný zkratový výkon na přípojnících s ohledem na rozběh největšího motoru :

Poměrná hodnota zkratového výkonu je rovna poměrné hodnotě zkratového proudu :

$$S_{kM} = i_{kM} \frac{u_e}{X_t} \quad (1.31)$$

Po dosazení vztahu (1.24) a (1.25) dostáváme :

$$S_{kM} = \frac{u_e}{u_e - u_M} \cdot i_t = \frac{u_e \cdot u_M}{u_e - u_M} \cdot \frac{S_p \sin \varphi_p + i_k S_m}{S_t} \quad (1.32)$$

S_{kM} ... poměrná hodnota zkratového výkonu na přípojnících M.1. (6,3 kV) vztažená na výkon transformátoru TS

$$(S_v = S_t)$$

$$S_{kM} = \frac{S'_{kM}}{S_t} \quad (1.33)$$

$$S'_{kM} = S_{kM} \cdot S_t = \frac{u_e}{\frac{u_e}{u_M} - 1} (S_p \sin \varphi_p + i_k S_m) \quad (1.34)$$

Dostáváme vztah pro potřebný minimální zkratový výkon na přípojnicích s ohledem na povolený pokles napětí u_M při rozběhu motoru M.

Kontrola úbytku napětí :

$$\Delta u_t = u_e \frac{x_t}{x_t + x_z} \quad (1.35)$$

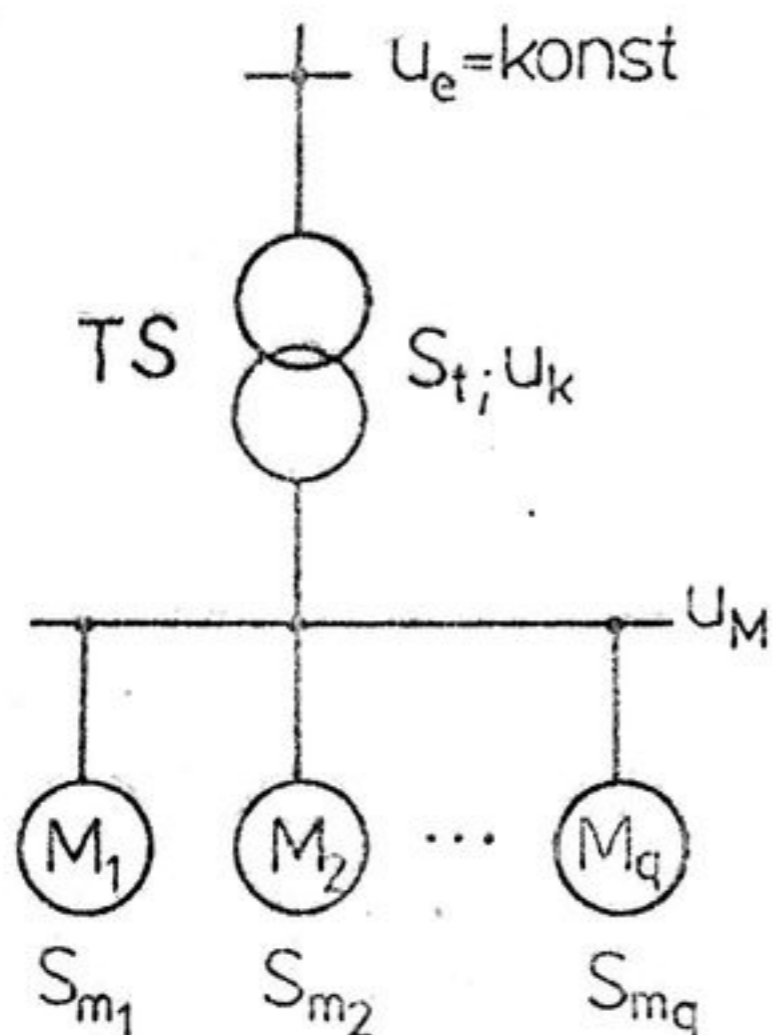
Přetížení transformátoru při rozběhu motoru M :

$$i_t = \frac{u_e}{x_c} = \frac{\Delta u_t}{x_t} \quad (1.36)$$

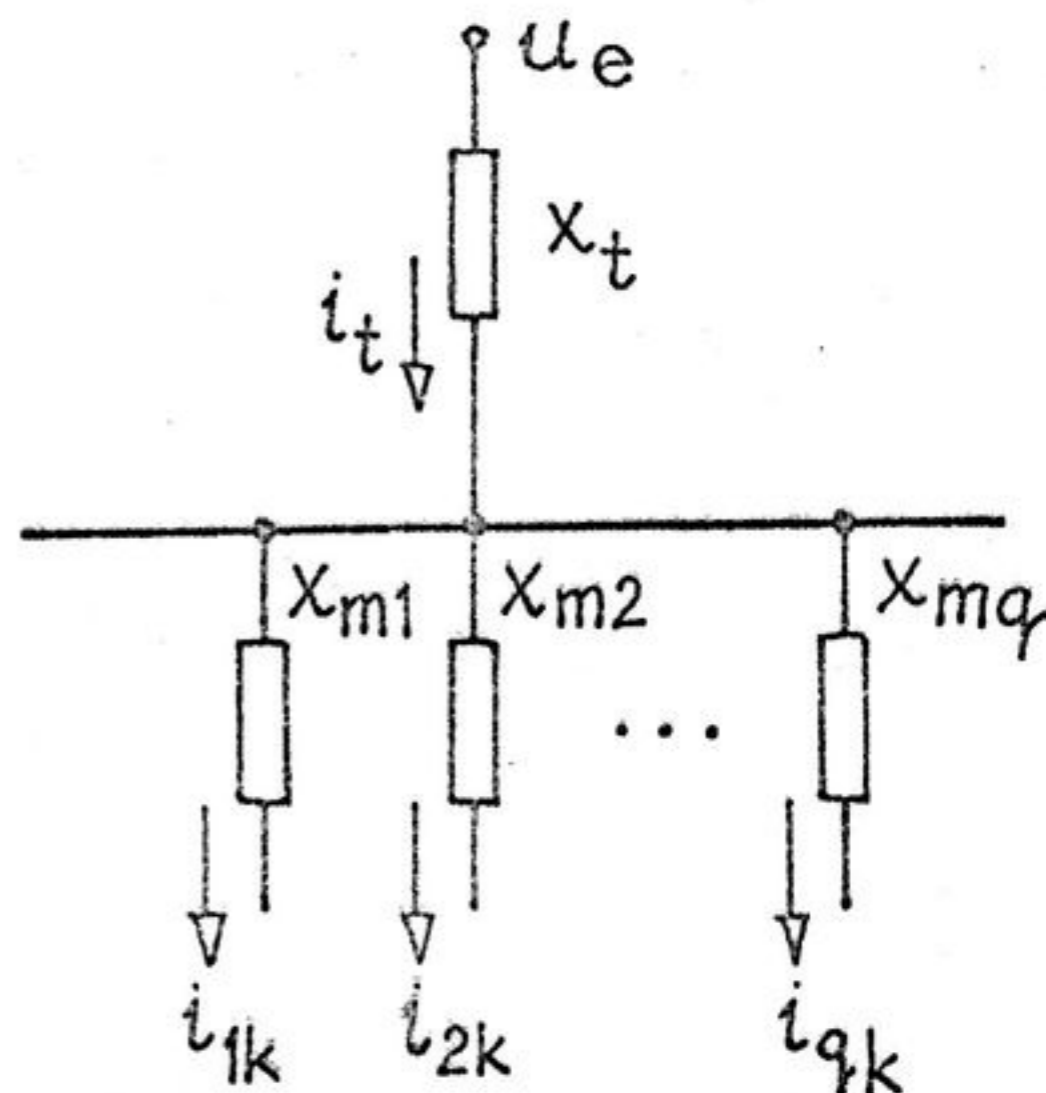
Kontrola výkonu zdrojů při samonajíždění skupiny elektromotorů

Při řešení tohoto úkolu předpokládáme, že v rozvodu elektrické energie vlastní spotřeby elektrárny došlo ke krátkodobé ztrátě napětí nebo k jeho hlubokému poklesu, což mělo za následek značné snížení otáček všech pohonů nebo jejich úplné zastavení. Při znovuobjevení napětí se začnou rozbíhat všechny motory, zúčastňující se samonajíždění. Situace je z hlediska proudových a napěťových poměrů mnohem horší než při rozběhu jednoho motoru. Z hlediska technicko-ekonomického je třeba provést návrh zdrojů a rozvodu elektrické energie tak, aby byly zajištěny základní požadavky technologického procesu. Samonajíždění může být proto zajištěno tak, aby se rozbíhaly skupiny motorů ve stanovených časových odstupech.

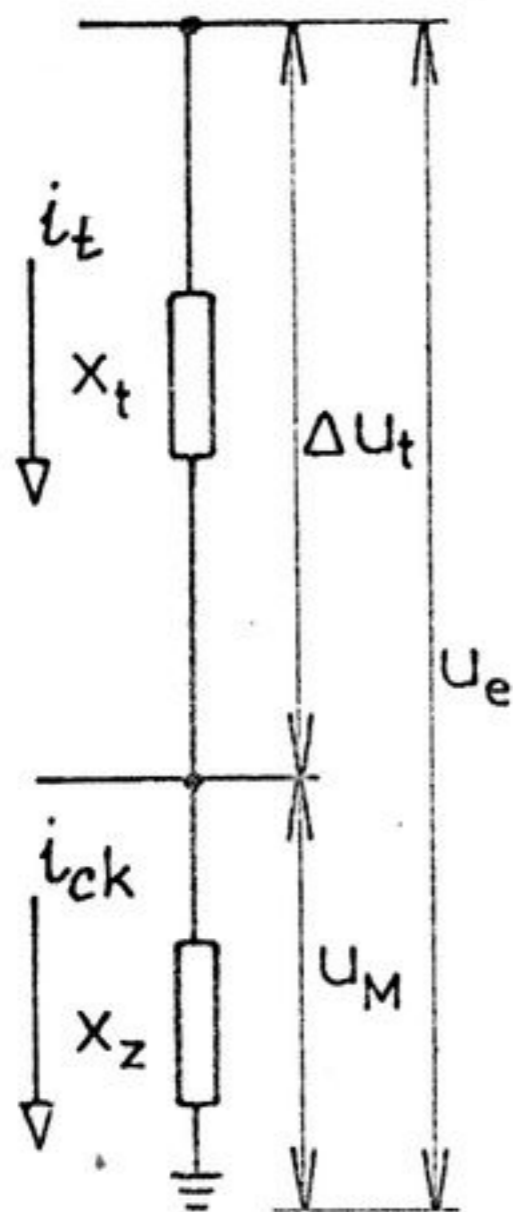
Na obr. 1. 49. je znázorněna situace napájení vlastní spotřeby pracovním zdrojem přes transformátor TS.



Obr. 1.49. Schema pro výpočet samonajíždění



Obr. 1.50. Náhradní schema samonajíždění



Obr. 1.51. Schema pro určení proudových a napěťových poměrů při samonajíždění

Celková náhradní reaktance zatížení je paralelním součtem reaktancí všech motorů nakrátko :

$$X_z = X_{m1} \parallel X_{m2} \dots \parallel X_{mq} \quad (1.37)$$

Výsledný proud, který odebírají všechny rozbíhající se motory je roven :

$$i_{ck} = (i_{1k} + i_{2k} + \dots + i_{qk}) \cdot \frac{1}{\sigma} \quad X_{ck} = \frac{u_e}{X_c} \quad (1.38)$$

Celkový zdánlivý výkon zátěže je roven součtu výkonů elektromotorů při rozběhu

$$S_{cm} = S_{m1} + S_{m2} + \dots + S_{mq} \quad (1.39)$$

Celková reaktance :

$$X_c = X_t + X_z \quad (1.40)$$

Proud procházející transformátorem TS :

$$i_t = i_{ck} = \frac{u_e}{X_c} = \frac{u_e}{X_t + X_z} \quad (1.41)$$

Náhradní reaktance motoru nakrátko :

$$X_m = \frac{1}{i_x} \cdot \frac{S_t}{S_m} \quad (1.42)$$

Náhradní reaktance zatížení

$$X_z = \frac{1}{i_{ck}} \cdot \frac{S_t}{S_{cm}} \quad (1.43)$$

Podle obr. 1.51. platí :

$$\frac{u_e}{u_M} = \frac{X_c}{X_z} \quad (1.44)$$

$$u_M = u_e \cdot \frac{X_z}{X_c} = u_e \cdot \frac{X_z}{X_t + X_z} \quad (1.45)$$

$$\frac{u_e}{\Delta u_t} = \frac{X_c}{X_t} \quad (1.46)$$

$$\Delta u_t = u_e \cdot \frac{X_t}{X_c} = u_e \cdot \frac{X_t}{X_t + X_z} \quad (1.47)$$

Podle vztahu (1.47) pak platí :

$$\Delta u_t (X_t + X_z) = u_e X_t$$

$$X_z = \frac{X_t (u_e - \Delta u_t)}{\Delta u_t} \quad (1.48)$$

Z rovnice (1.43) určíme vztah pro celkový maximální přípustný výkon motorů při rozběhu :

$$\frac{S_{cm}}{S_t} = \frac{1}{i_{ck} \cdot X_z} = \frac{\Delta u_t}{i_{ck} X_t (u_e - \Delta u_t)}$$

$$S_{cm} = S_t \frac{\Delta u_t}{u_e - \Delta u_t} \cdot \frac{1}{i_{ck} X_t} \quad (1.49)$$

Celkový jmenovitý výkon motorů, které se mohou zúčastnit samonajíždění při splnění podmínky dovoleného úbytku napětí je pak :

$$\sum S_m = \frac{1}{i_{k \text{ prům}}} \cdot S_{cm} \quad (1.50)$$

$i_{k \text{ prům}}$... průměrná hodnota rozběhových proudů motorů.

1.6. Výpočet poměrů při zkratech ve vlastní spotřebě elektrické energie elektráren

Při provozu elektrických zařízení elektráren je nutno uvažovat nejen s normálními provozními stavy, ale i s různými poruchovými jevy jako jsou přetížení, zkraty, přepětí apod. Přestože jsou zařízení projektována a provedena podle platných norem a předpisů s ohledem na provozní spolehlivost a bezpečnou práci obsluhujících osob, není možné zcela zamezit vzniku uvedených poruch.

Jednou z nejvýznamnějších poruch, které musíme předpokládat v elektrických silnoproudých zařízeních je zkrat. Zkratem nazýváme nežádoucí vzájemné vodivé spojení různých fází elektrizační soustavy v daném místě. V soustavě s uzemněným nulovým bodem vzniká jednopólový zkrat porušením izolace mezi vodičem a zemí nebo uzemněnou kostrou stroje, nebo přímým spojením fáze se zemí. Toto chybné vodivé spojení způsobí značný vzrůst proudu nad obvyklou provozní hodnotu tím, že celková impedance zkratového obvodu je daleko menší než impedance obvodu, ve kterém jsou zařazeny spotřebiče při normálním bezporuchovém provozu. Zkratový proud namáhá elektrická zařízení svými silovými a tepelnými účinky. Elektrická zařízení a jejich nosné konstrukce musí být navržena a provedena tak, aby při působení zkratových proudů, které se mohou v daném místě vyskytnout nevzniklo na nich poškození nebo deformace elektrického, mechanického nebo tepelného charakteru, které by bránily jejich další spolehlivé funkci.

Napětí v místě zkratu klesne téměř na nulu, takže celkové vnitřní napětí zdroje se spotřebuje na úbytky napětí v alternátorech, transformátorech, ve vedeních nebo v dalších prvcích sítě (například v reaktorech). V celém postiženém obvodu se projeví pokles napětí, které vzrůstá od místa zkratu směrem ke zdroji: jsou to tzv. zbytková napětí.

Za zkrat nepovažujeme zemní spojení, které nastává v soustavě s izolovaným nulovým bodem při spojení jedné fáze se zemí nebo kostrou stroje. V provozu elektrárny to jsou soustavy rozvodu vysokého napětí 6 kV a systém vinutí statoru alternátoru včetně vyvedení výkonu do hlavního blokového transformátoru a do transformátoru vlastní spotřeby.

Stanovení velikosti zkratových proudů vyplývá z Ohmova zákona, kdy předpokládáme, že zkratový obvod je napájen ze zdroje o stálém napětí a zkratový proud je určen celkovou impedancí tohoto obvodu. Stanovení této celkové impedance je v obecné elektrizační soustavě nebo i ve vlastní spotřebě elektráren poměrně složitá úloha, protože každé jednotlivé zařízení má svůj ohmický a induktivní odpor a pracuje na určité hladině napětí. Řešený obvod je většinou dosti složitý, neboť obsahuje řadu větví a prvků. Proto s výhodou vyšetřujeme elektrizační soustavu nebo vnitřní rozvody elektráren počítáním s poměrnými nebo procentními hodnotami. Počítání s poměrnými nebo procentními hodnotami se zakládá na převodu reaktance nebo ohmického odporu vyjádřeného v ohmech na hodnotu v procentech při daném jmenovitém napětí proudu a výkonu.

Procentní reaktance prvku elektrizační soustavy X [%] (alternátoru, transformátoru, přenosových a rozvodných vedení a dalších zařízení) je taková reaktance, na které vzniká při průchodu jmenovitého proudu úbytek napětí rovný procentní reaktanci. Úbytek napětí vyjadřuje sdruženou hodnotu stejně jako jmenovitá hodnota napětí.

$$X_{\%} = \Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} X \cdot I_n}{U_n} \cdot 100 \quad (1.51) \quad \frac{S}{\sqrt{3} U_n} = \frac{S}{U_n}$$

Úpravou předcházejícího vztahu lze vyjádřit

$$X_{\%} = X \cdot \frac{S_n}{U_n^2} \cdot 100 \quad (1.52) \quad S = \sqrt{3} U_n I_n$$

kde: S_n ... zdánlivý jmenovitý výkon

Obráceně lze pak určit skutečnou reaktanci v ohmech :

$$X = x_{\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (1.53)$$

Zkratový proud určíme podle vztahu :

$$I_{ks} = \frac{U_n}{\sqrt{3}X} = \frac{\sqrt{3} U_n I_n}{\sqrt{3} U_n x_{\%}} \cdot 100 = \frac{I_n}{x_{\%}} \cdot 100 \quad (1.54)$$

Po úpravě (vynásobením $\sqrt{3} U_n$) dostaneme výraz pro zkratový výkon :

$$S_{ks} = \frac{S_n}{x_{\%}} \cdot 100 \quad (1.55)$$

Zkratový výkon je fiktivní hodnota, která je rovna :

$$S_{ks} = \sqrt{3} I_{ks} U_n \quad (1.56)$$

Protože při zkratu nastává značný pokles napětí, není tento údaj reálný a proto se udávají hodnoty proudové, které v daném místě elektrickým zařízením při zkratu protékají.

Ve vztazích (1.55) a (1.56) lze nahradit veličiny výkonu, napětí a proudu vztažnými veličinami :

$$\left. \begin{array}{l} S_v - \text{vztažný výkon} \\ U_v - \text{vztažné napětí} \\ I_v - \text{vztažný proud} \end{array} \right\}$$

Tyto veličiny volíme libovolně jako převodní základ pro přepočet jmenovitých hodnot na vztažnou hodnotu. Dvě z uvedených hodnot jsou volitelné, třetí je vázána vztahem :

$$S_v = \sqrt{3} U_v I_v \quad (1.57)$$

Zkratové výkony a proudy při respektování zatížení alternátorů a odchylky napětí od jmenovité hodnoty pro první okamžik zkratu jsou vyjádřeny vztahy :

$$I_{ks} = k \cdot \frac{I_v}{x_{\%}} \cdot 100 \quad (1.58)$$

$$S_{ks} = k \cdot \frac{S_v}{x_{\%}} \cdot 100 \quad (1.59)$$

Konstantu k lze pro většinu případů volit 1,1.

Uvažujeme-li složitější situaci, kdy ve zkratovém obvodu bude zapojeno více prvků elektrizační soustavy, pak je třeba určit výslednou náhradní reaktanci všech prvků od zdroje až k místu zkratu. Pod pojmem " zdroj " rozumíme v elektrizační soustavě vedle alternátoru také " náhradní zdroj ", který v daném místě soustavy zastupuje svými parametry všechny připojené zdroje při respektování konfigurace sítě. Abychom mohli reaktance jednotlivých prvků sečítat, je třeba je převést přepočítat na převodní základ.

V úvodu bylo řečeno, že procentní reaktance závisí na proudu I_n . Při průchodu jiného proudu například vztažného bude jiná reaktance [podle (1.55)] vztažená na tento proud nebo vztažený výkon [podle (1.57)]:

$$x_{v\%} = \frac{\sqrt{3} X I_v}{U_n} \cdot 100 \quad (1.60)$$

Dosazením za X ze vztahu (1.53) a vynásobením U_n dostáváme:

$$x_{v\%} = \frac{x_{\%} U_n^2}{S_n} \cdot \frac{\sqrt{3} I_v U_n}{U_n^2} = x_{\%} \frac{S_v}{S_n} \quad (1.61)$$

Parametry jednotlivých prvků elektrizační soustavy a způsob jejich uplatnění při stanovení poměrů při zkratech jsou obsaženy v ČSN 380411.

Zásadně jsou zkratové poměry určeny těmito parametry :

- počátečním rázovým zkratovým proudem I_{ks}
- nárazovým zkratovým proudem I_{km}
- ekvivalentním oteplovacím zkratovým proudem I_{ke}
- dobou trvání zkratu t_k

Počáteční rázový zkratový proud I_{ks} je efektivní hodnota souměrného zkratového proudu (bez stejnoměrné složky při trojfázovém zkratu v čase 0,01 sec).

Nárazový zkratový proud I_{km} je vrcholová hodnota nesouměrného zkratového proudu v čase 0,01 sec při trojfázovém zkratu:

$$I_{km} = K \cdot \sqrt{2} I_{ks} \quad (1.62)$$

Konstanta K respektuje tlumení stejnosměrné složky proudu. Hodnoty K jsou uvedeny v ČSN 380411.

Ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} je takový proud, jehož tepelné účinky jsou stejné jako účinky nesouměrného zkratového proudu, který se s časem mění a to v uvažované době trvání zkratu t_k

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt} \quad (1.63)$$

1.6.1. Dimenzování elektrických zařízení podle účinků zkratových proudů

Při volbě elektrického zařízení je třeba vycházet ze zkratových poměrů v místě jeho instalace, účinků zkratových proudů na zařízení a je nutné uvážit zejména tyto otázky :

- Schema zařízení :

neuvažuje se vliv rezerv, které nejsou podle provozních předpisů v chodu, rovněž se neuvažují zapojení, která vzniknou při krátkodobém přepínání zdrojů, i když se při nich zhorší zkratové poměry. Kontrola se provede pro zapojení, které je uvažováno provozními předpisy a které dává nejhorší podmínky pro dimenzování.

- Místo zkratu :

při vícenásobném napájení místa zkratu se uvažují jen proudy, které skutečně protékají přístroji a vodiči. Třífázové zapouzdřené vodiče a jednotlivé kabely se dimenzují podle zkratových poměrů na začátku. Celkový průřez paralelních kabelů se určí podle zkratových poměrů na konci.

-Druh zkratu :

zařízení je třeba kontrolovat pro ten druh zkratu, při kterém vzniká nejhroší kontrolované namáhání. Při kontrole mechanického namáhání elektrických zařízení se vychází z třípólového nárazového zkratového proudu.

Při kontrole tepelného působení se vychází v soustavách s izolováním nebo neúčinně uzeměným nulovým bodem z hodnot troj-pólového nebo dvoj-pólového zkratového proudu.

- Doba zkratu :

Při kontrole tepelného působení je třeba uvažovat nejdelší možnou dobu zkratu. Je dána dobou nastavení základní ochrany a vypínací dobou vypínače.

Odolnost zařízení při namáhání účinky zkratových proudů je určena těmito parametry :

- jmenovitým dynamickým proudem I_{dyn}
- jmenovitým zapínacím proudem I_{zap}
- jmenovitým vypínacím proudem I_{vyp}
- krátkodobým proudem I_{th}
- dobou trvání zkratu t_k

Pro přepočítání ekvivalentního oteplovacího proudu I_{ke_1} , který byl určen pro dobu trvání zkratu t_{k_1} na dobu trvání zkratu t_{k_2} platí :

$$I_{ke_1}^2 \cdot t_{k_1} = I_{ke_2}^2 \cdot t_{k_2} \quad (1.64)$$

Krátkodobý proud zařízení nesmí být menší než vypočtený ekvivalentní oteplovací proud. Jmenovitý dynamický proud zařízení nesmí být menší než je vypočtený nárazový zkratový proud v místě použití zařízení.

Kontrola oteplení vodičů při zkratu :

Minimální průřez vodiče se určí podle vzorce :

$$S = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{k} \quad (1.65)$$

kde k je činitel daný materiálem vodiče a zatížením vodičů před zkratem. Respektuje teplotu vodičů před zkratem a po zkratu.

$$k = \sqrt{\frac{(\nu + 20) c_0}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\nu + \nu_k}{\nu + \nu_1}} \quad (1.66)$$

kde :

- S ... průřez vodiče $[\text{mm}^2]$
 I_{ke} .. ekvivalentní oteplovací zkratový proud určený pro dobu trvání zkratu t_k [A]
 t_k .. doba trvání zkratu [sec]
 ϑ .. fiktivní teplota vodiče podle materiálu vodiče $[^{\circ}\text{C}]$
 c_o .. specifické teplo pro 0°C $[\text{J}/\text{cm}^3/^{\circ}\text{C}]$
 ρ_{20} .. specifický odpor při 20°C $[\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$
 ϑ_1 .. teplota vodiče před zkratem (podle ČSN 34 10 20) $[^{\circ}\text{C}]$
 ϑ_k .. maximální dovolená teplota vodiče při zkratu $[^{\circ}\text{C}]$

Při výpočtu se neuvažuje odvod tepla a předpokládá se, že je v celém průřezu vodiče stejná teplota.

Tab. 2. Hodnoty materiálových konstant :

| Materiál vodiče | ϑ $[^{\circ}\text{C}]$ | c_o $[\text{J}/\text{cm}^3/^{\circ}\text{C}]$ | ρ_{20} $[\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$ |
|-----------------|----------------------------------|---|---|
| Cu | 234,5 | 3,5 | 0,01786 |
| Al | 228,0 | 2,417 | 0,02941 |
| Fe | 222,0 | 3,77 | 0,143 |

Kontrola mechanického namáhání vodičů při zkratu

V této kapitole bude uvedena kontrola tuhých vodičů, upevněných na tuhých podpěrách na dynamické účinky zkratového proudu.

U rovnoběžných vodičů se určí síla působící na jednotku délky vodiče podle vztahu :

$$f_k = k_1 \cdot k_2 \cdot 2,0 \frac{I_{km}^2}{a} \cdot 10^{-7} \quad [\text{N/m}] \quad (1.67)$$

f_k ... je síla na 1 m délky vodiče

k_1 ... je koeficient tvaru vodiče, který respektuje rozložení proudu. U kruhových vodičů je $k_1 = 1$.

k_2 je koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posun proudů v jednotlivých vodičích; u dvou vodičů nebo při dvoupólovém zkratu je $k_2 = 1$.

U prostředního vodiče trojfázové soustavy při rovinném uspořádání a trojpólovém zkratu je $k_2 = 0,87$.

U krajního vodiče je při stejných podmínkách $k_2 = 0,81$.

Maximální ohybový moment v polích s podpěrkami na obou koncích je roven :

$$M_o = \frac{f_k \cdot l^2}{10} = \frac{F_k \cdot l}{10} \quad [\text{Nm}] \quad (1.68)$$

kde F_k .. je celková síla působící na vodič délky l [N]

l .. je vzdálenost mezi podpěrkami [m]

Maximální ohybový moment v polích, kde jsou tuhé vodiče montovány letmo nebo s pružnou spojkou

$$M_o = \frac{f_k \cdot l^2}{2} = \frac{F_k \cdot l}{2} \quad [\text{N.m}] \quad (1.69)$$

Význam veličin je stejný jako v předešlém případě.

l ... je délka vodiče uloženého letmo nebo od podpěrky k pružné spojce. [m]

Největší namáhání vodiče složeného z více pasů se určí jako součet namáhání vzniklého působením proudu vodičů druhých fází a namáhání od dílčích proudů v pasech téže fáze.

Působí-li zkratová síla kolmo na hlavní osu průřezu vodiče postupuje se takto :

Určí se namáhání vzniklé působením proudů druhých fází :

$$\sigma_1 = \frac{M_{o1}}{W_{o1}} = \frac{f_{k1} \cdot l_1^2}{10W_{o1}} = \frac{F_{k1} \cdot l_1}{10W_{o1}} \quad (1.70)$$

kde :

σ_1 je dílčí namáhání od proudů druhých fází [Pa]

W_{o1} průřezový modul složeného vodiče k ose kolmé na směr síly (viz. ČSN 381754) [cm³]

Hodnoty f_{k1} , F_{k1} , jsou určeny pro délku l_1 podle vztahu (1.67) .

Namáhání působením dílčích proudů v pasech téže fáze

Celkový proud ve fázi se rozdělí nerovnoměrně do jednotlivých pasů, které tvoří fázový vodič. Rozdělení proudů je uvedeno v ČSN 381754.

Síla na jednotku délky krajního pasu :

$$f_{k2} = 2,0 I_1 \sum_{n=2}^k \frac{k \ln \cdot I_n}{a_{1n}} \cdot 10^{-7} \quad [\text{N/m}] \quad (1.71)$$

kde :

f_{k2} ... je síla na jednotku délky pasu od sousedních (rovnoběžných pasů stejné fáze

I_1 až I_n jsou proudy v jednotlivých dílčích pasech

k_{1n} ... je koeficient tvaru vodiče mezi vodiči 1 a n , (viz ČSN 381754)

a_{1n} ... je osová vzdálenost mezi vodičem 1 a n .

Namáhání způsobené průchodem proudu v dílčích pasech fázového vodiče :

$$\sigma_2 = \frac{M_{o2}}{W_{o2}} = \frac{f_{k2} \cdot l_2^2}{10 W_{o2}} = \frac{F_{k2} \cdot l_2}{10 W_{o2}} \quad (1.72)$$

f_{k2} ... je síla na jednotku délky pasu od sousedních dílčích pasů

l_2 ... je vzdálenost mezi pevným spojením dílčích pasů

Celkové namáhání smí být rovno nejvýše dvojnásobné mezi průtažnosti $\sigma_{0,2}$.

Osová vzdálenost mezi podpěrkou celého fázového vodiče a vložkou mezi dílčími vodiči se volí tak, aby σ_2 nepřekročilo mez průtažností.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \leq 2\sigma_{0,2} \quad (1.73)$$

$$\sigma_2 \leq \sigma_{0,2} \quad (1.74)$$

Hodnoty meze průtažnosti $\sigma_{0,2}$ pro :

$$\text{Hliník } \sigma_{0,2 \text{ al}} = 44,1 \text{ MPa}$$

$$\text{Měď } \sigma_{0,2 \text{ cu}} = 88 \text{ MPa}$$

Kontrola podpěrek při zkratu :

Při zkratu působí v těžišti průřezu vodiče na podpěrku síla u koncových podpěrek

$$F_k = v_f \frac{l \cdot f_{k1}}{2} \quad (1.75)$$

u průběžných podpěrek :

$$F_k = v_f \cdot l \cdot f_{k1} \quad (1.76)$$

kde :

F_k ... je síla působící na podpěrku v těžišti vodiče [N]

f_{k1} .. je síla na jednotku délky vodiče od proudu v sousedních fázích podle (1.67)

l ... je rozpětí pole

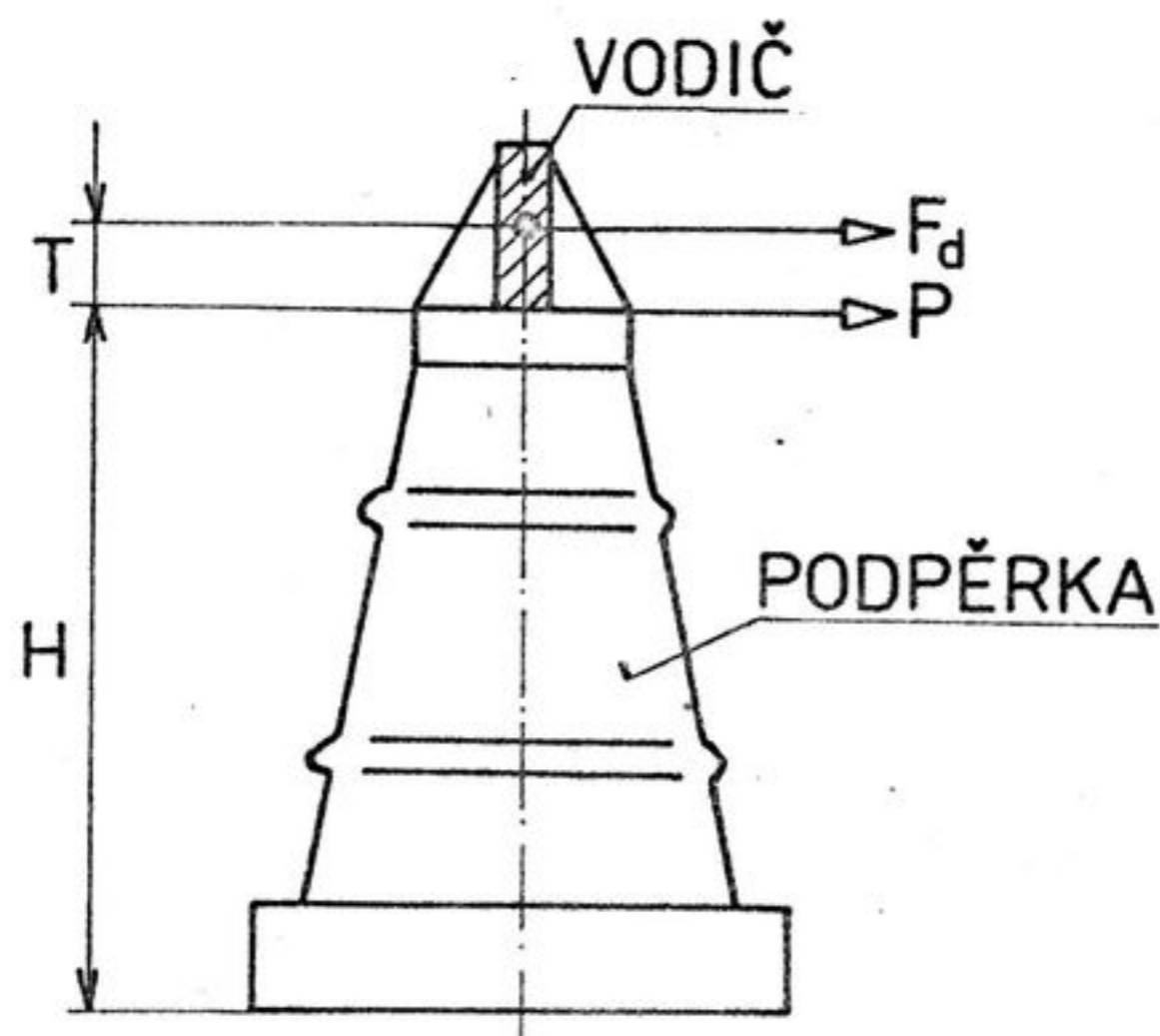
v_f ... je koeficient respektující rezonanci

$$v_f = 1 \text{ při } \sigma_1 + \sigma_2 \geq 0,8 \sigma_{0,2} \quad (1.77)$$

$$v_f = \frac{0,8 \sigma_{0,2}}{\sigma_1 + \sigma_2} \text{ nejvýše je hodnota } v_f = 5 \text{ pro } \sigma_1 + \sigma_2 < 0,8 \sigma_{0,2} \quad (1.78)$$

σ_1 a σ_2 jsou namáhání definovaná podle vztahů (1.70) a (1.72) .

Podpěrky jsou správně dimenzovány tehdy, je-li síla F_k , působící v těžišti průřezu vodiče nejvýše 80 % zaručené mechanické pevnosti udávané výrobcem v závislosti na vzdálenostech působitě síly od vrcholu podpěrky. Síla působící kolmo na osu podpěrky, nesmí překročit dovolenou sílu F_d : $F_k \leq F_d$



$$F_d = 0,8 P \cdot \frac{H}{H+T} \quad (1.79)$$

Obr. 1.52. Síly působící na podpěrku

Kde :

- F_d ... je dovolená síla působící ve vzdálenosti T od horní armatury podpěrky [N]
- P ... je zaručená mechanická pevnost podpěrky udaná výrobcem [N]
- H ... je výška podpěrky [mm]
- T ... je vzdálenost mezi působitě síly F_d a horní armaturou podpěrky [mm]
- F_k ... je síla působící na podpěrku v těžišti vodiče určena podle vztahů (1.75) a (1.76)

1.7. Zkoušky ve vlastní spotřebě elektrické energie elektráren

Součástí projektu elektrárny je i výpočet nastavení ochran ve vlastní spotřebě. Funkcí ochran a automatů zásoků je třeba při uvádění elektrárny do provozu (případně po větších rekonstrukcích a úpravách) ověřit zkouškami a podle výsledků zkoušek se provede definitivní nastavení ochran ve vlastní spotřebě. Protože tyto zkoušky jsou rizikové (prováděné pod zatížením se skutečným vypínáním apod.), je nutné před jejich proveděním zajistit bezvadný stav technologického zařízení, jeho odzkoušení a předem odzkoušet technologické ochrany zabezpečovacího systému. Jde zejména o vypínací zkoušky turbosoustrojí z nulového výkonu při jmenovitých otáčkách z jmenovitého výkonu a z jmenovitého výkonu na vlastní spotřebu elektrické energie. Turbosoustrojí musí být schopno po výpadku vývodového vedení převzít zařízení vlastní spotřeby a tak udržet blok v pohotovosti k opětovnému přifázování. Musí být provedeny primární zkoušky ochran.

Jako první část zkoušek ve vlastní spotřebě se provádějí zkoušky rozběhů důležitých elektromotorů 6 kV i 0,4 kV k prověření proudových a napěťových poměrů při rozběhu. Jsou podkladem pro následné zkoušky samonajíždění a definitivní nastavení ochran.

Dále se přistupuje ke zkouškám záskoků, kde se prověřují všechny varianty vyprojektovaných a namontovaných automatických pochodů samočinné zálohy. Postupuje se od zkoušek jednodušších ke zkouškám složitějším. Nejprve se provádějí zkoušky rozveden 0,4 kV blokových a společné, potom rozveden 6 kV. Zkouší se všechny druhy samočinného zapnutí záložního zdroje podle projektu t.j. zások normální, zpětný, zpožděný, samočinné zapnutí zajištěné sekce, dieselsekce, nouzové zdroje atd. Pro tyto zkoušky musí být sestaven podrobný program a schválen dispečinkem. Při zkouškách se oscilografují proudy záložních a hlavních přívodů, napětí na přípojnicích rozveden, interferenční napětí, otáčky vybraných pohonů, signály automatik, působení ochran. Vyhodnocení výsledků měření je využito pro případné úpravy zařízení a definitivní nastavení ochran.

Interferenční napětí

Jako interferenční napětí se označuje součet napětí doznívajícího, generovaného motoru a napětí záložního zdroje. Dojde-li k zapnutí záložního přívodu v nepříznivém okamžiku (v maximu interferenčního napětí), vznikne proudový ráz, který velmi namáhá motor. Při zkouškách se měří průběh interferenčního napětí a zjišťuje se, zda dochází k zapnutí záložního přívodu ve vhodný okamžik. Průběh interferenčního napětí je dán skladbou dobíhajících pohonů. Časy samočinného zapnutí záložního zdroje jsou určeny hlavně časy vypínačů a časy relé v automatikách (doby pro zapnutí a vypnutí). Pro vlastní spotřebu je třeba takové provedení, aby beznapěťové přerušení bylo vždy co nejkratší a elektrické přepnutí bylo provedeno dříve, než působí strojní ochrany technologického zařízení. Při samočinném zapnutí záložního zdroje, kdy je vzat signál " od polohy " akčního orgánu, je beznapěťová prodleva dána v podstatě pouze časy vypínačů (0,2s). Při samočinném zapnutí " od podpětí " jsou časy delší (1 až 2s). Při delších beznapěťových prodlevách dochází k dlouhým a velkým rozběhovým proudům, hlubokým poklesům napětí, které v nepříznivém případě mohou způsobit výpadky na zařízení společné vlastní spotřeby a jiných bloků. V našich kondenzačních elektrárnách má interferenční napětí za normální skladby pohonů první maximum v čase asi $0,4 \div 0,45s$. Z toho vyplývá, že časy pro samočinné zapnutí záložního zdroje jsou vhodné před prvním maximem nebo za prvním maximem interferenčního napětí.

1.8. Mimořádné provozní stavy ve vlastní spotřebě elektrické energie elektráren

Elektrárenské bloky musí v poruchových stavech elektrizační soustavy, charakterizovaných existencí mimořádných hodnot kmitočtu a napětí, poskytovat největší možnou podporu k udržení provozu elektrizační soustavy i za těchto mimořádných okolností a přispět k likvidaci poruchového stavu. Schopnost bloků pracovat při mimořádných hodnotách kmitočtu a napětí je omezená. Blok, který se blíží k hranici svých provozních schopností je účelné odpojit od soustavy a provozovat jej na vlastní spotřebu. Tak je nejlépe připraven pro opětovné nafázování a zatěžování.

Konstrukce konvenčních elektrárenských bloků musí podle doporučení stálé komise RVHP pro elektrickou energii připouštět provoz v období havarijních režimů elektrizační soustavy při změněném kmitočtu v pásmu $51 \div 50,5$ Hz jednorázově 30 minut, celkem za rok 120 minut, v pásmu $50,5 \div 49$ Hz časově neomezeno (napětí v bodě napojení bloku v rozmezí $0,9 \div 1,05 U_n$), v pásmu $49 \div 48$ Hz jednorázově 30 minut, celkem za rok 120 minut.

Rovněž zařízení jaderné elektrárny musí být schopné provozu bez omezení v rozsahu kmitočtu $49 \div 50,5$ Hz a při napětí v bodě napojení bloku do elektrizační soustavy v rozmezí $0,9 \div 1,05 U_n$.

Zařízení jaderné elektrárny musí být schopné provozu při zvýšení kmitočtu v omezeném čase:

v pásmu $50,5 \div 51$ Hz maximálně 15 minut v jednotlivém případě, celková doba trvání takových případů 2 h za rok,

v pásmu $51 \div 52$ Hz maximálně 10 minut v jednotlivém případě, celková doba trvání takových případů 1 h za rok,

v pásmu $52 \div 53$ Hz maximálně několik minut, méně než 10 minut za rok.

Mimo to musí zařízení elektráren snášet přechodné zvýšení kmitočtu při odpojení turboalternátoru z plného výkonu na vlastní spotřebu elektrické energie.

Zařízení jaderné elektrárny musí být schopné provozu při snížení kmitočtu po dobu časově omezenou:

v pásmu $49 \div 48$ Hz maximálně 15 minut v jednotlivém případě, celková doba trvání takových případů 2 h za rok při jmenovitém výkonu,

v pásmu $48 \div 47$ Hz maximálně 10 minut v jednotlivém případě, celková doba trvání takových případů 1 h za rok při sníženém výkonu,

v pásmu $47 \div 46$ Hz maximálně několik minut v jednotlivém případě, maximálně 10 minut za rok při sníženém výkonu.

Zařízení jaderné elektrárny musí být schopno provozu při sníženém napětí (v místě napojení bloku do elektrizační soustavy) po dobu časově omezenou:

v rozsahu $0,9 \div 0,8 U_n$ maximálně 30 minut, výkon bloku jmenovitý,

v rozsahu $0,8 \div 0,7 U_n$ maximálně 5 minut, výkon bloku jmenovitý

pod hodnotu $0,7 U_n$, případně při úplné ztrátě napětí ve vlastní spotřebě s trváním do 3s.

Blok musí být schopen provozu při současném výskytu mimořádných hodnot kmitočtu a napětí s omezeními, která vyplývají z předcházejících bodů.

Blok se odpojuje od sítě a napájí vlastní spotřebu při těchto mimořádných hodnotách:

kmitočet 46 Hz

napětí $0,7 U_n$, pokud pokles trvá déle než 3s

V elektrárnách, které mají v elektrizační soustavě zcela mimořádnou důležitost doporučuje se instalovat havarijní záložní zdroj, aby bylo možno postupně najíždět jednotlivé bloky i při úplné ztrátě napětí přiváděného do elektrárny ze sítě.

1.9. Metoda spolehlivostního výpočtu silnoproudých schemat vlastní spotřeby elektrické energie elektráren

Na zajištění vysoké spolehlivosti provozu elektráren má jeden z rozhodujících vlivů bezporuchový provoz vlastní spotřeby elektrické energie ve všech provozních stavech. Kladné výsledky, dosažené při zajišťování spolehlivosti složitých technických zařízení v různých průmyslových odvětvích využitím aplikace teorie spolehlivosti (zvláště v oblasti elektroniky) jsou nyní stále více uplatňovány i v energetice a energetickém strojírenství.

Metody teorie spolehlivosti, které na základě obecných poznatků fyzikální podstaty dějů, spojených u technických zařízení se ztrátou schopnosti plnit požadované funkce, umožňují s využitím metod počtu pravděpodobnosti, matematické statistiky, teorie odhadu, případně i dalších matematických metod objektivně hodnotit spolehlivost technických zařízení kvantitativně. Takto získané hodnoty a poznatky je možno využít pro zdokonalování provozovaných zařízení, v projektování nových zařízení, v konstrukci a výrobě nových strojů a přístrojů s předem určenou spolehlivostí.

Metody teorie spolehlivosti umožňují vyjádřit matematickými modely napozorované jevy, související s poruchovostí, životností a dalšími spolehlivostními vlastnostmi výrobku. Matematické modely lze použít ke kvantitativní předpovědi chování energetických zařízení v dalším provozu, dále pro vzájemné porovnávání různých alternativ řešení mezi sebou a pro optimalizaci nebo k návrhu zařízení a způsobu provozu se zadanou úrovní spolehlivosti. Ve zde předkládaném řešení je z různých metod výpočtů spolehlivosti systému uvedena metoda spolehlivostních blokových schémat, která je výhodná pro aplikaci v projekční praxi. Pro spolehlivostní výpočty silnoproudých schémat vlastní spotřeby elektrické energie elektráren se zde vychází z těchto předpokladů: prvky systému jsou dvoustavové (prvek může být buď v bezporuchovém nebo poruchovém stavu), prvky jsou opravitelné, prvky i soustava jsou systematicky udržovány, poruchy prvků jsou na sobě nezávislé, intenzita poruch a oprav jsou ve sledovaném období konstantní. Pro řešení provozní spolehlivosti silnoproudého schématu vlastní spotřeby el. energie je zde z dílčích spolehlivostních vlastností použito pohotovosti a bezporuchovosti, vyjádřených součinitelem pohotovosti, poruchovosti a střední dobou bezporuchového provozu a oprav.

Součinitel pohotovosti udává pravděpodobnost, že objekt v ustáleném provozním režimu bude v provozu schopném stavu v libovolně zvoleném okamžiku a je vyjádřen vztahem:

$$K = \frac{\sum t_p}{\sum t_p + \sum t_o} \quad (1.80)$$

kde :

$\sum t_p$... celková doba provozu ve sledovaném období

$\sum t_o$... celková doba oprav ve sledovaném období

Součinitel poruchovosti vyjadřuje pravděpodobnost, že objekt v ustáleném provozním režimu bude mít poruchu v libovolně zvoleném okamžiku a je vyjádřen vztahem :

$$k = \frac{\sum t_o}{\sum t_p + \sum t_o} \quad (1.81)$$

Oba součinitelé jsou vázány vztahem :

$$K + k = 1 \quad (1.82)$$

Střední doba bezporuchového provozu

$$T_p = \frac{\sum t_p}{m} \quad (1.83)$$

kde :

m ... počet poruch ve sledovaném období

Střední doba opravy :

$$T_o = \frac{\sum t_o}{m} \quad (1.84)$$

Intenzita poruch (při exponenciálním rozdělení poruch) :

$$\lambda = \frac{1}{T_p} \quad (1.85)$$

Intenzita oprav :

$$\mu = \frac{1}{T_o} \quad (1.86)$$

Součinitel pohotovosti (1.80) a poruchovosti (1.81) můžeme vypočítat i ze středních dob a z intenzit dle vztahů :

$$K = \frac{T_p}{T_p + T_o} ; \quad K = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$
$$k = \frac{T_o}{T_p + T_o} ; \quad k = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \quad (1.87)$$

Poruchové stavy některých elektrických prvků (odpojovače, vypínače apod.) je účelné rozdělit na zkratové poruchové stavy a nezkratové poruchové stavy.

K nezkratovým poruchám dochází nejčastěji selháním mechanismu vypínače, přerušením vodiče apod. Selhání mechanismu může mít za následek např. neprovedení zepnutí či vypnutí, nežádoucí vypnutí apod.

Definice a vzájemné vztahy příslušných dílčích spolehlivostních ukazatelů vycházejí ze základního předpokladu, že zkratový a nezkratový poruchový stav se navzájem vylučují. Prvek, který je v poruchovém stavu, může být buď v poruchovém stavu zkratovém nebo v poruchovém stavu nezkratovém.

Součinitel zkratové poruchovosti k^x vyjadřuje pravděpodobnost, že prvek je v daném okamžiku v poruchovém stavu zkratovém a je vyjádřen vztahem :

$$k^x = \frac{\sum t_o^x}{\sum t_p + \sum t_o} \quad (1.88)$$

kde :

$\sum t_o^x$... značí celkovou dobu zkratových prostojů

Součinitel nezkratové poruchovosti k^o vyjadřuje pravděpodobnost, že prvek je v daném okamžiku v poruchovém stavu nezkratovém a je vyjádřen vztahem :

$$k^o = \frac{\sum t_o^o}{\sum t_p + \sum t_o} \quad (1.89)$$

Vzájemný vztah součinitelů poruchovostí je určen vztahem :

$$k = k^x + k^o \quad (1.90)$$

Pravděpodobnost, že prvek v daném okamžiku není ve zkratovém poruchovém stavu určuje součinitel:

$$K^x = 1 - k^x \quad (1.91)$$

Pravděpodobnost, že prvek není v nezkratovém poruchovém stavu určuje součinitel:

$$K^0 = 1 - k^0 \quad (1.92)$$

Součinitelé K^x , K^0 jsou doplňky odpovídajících součinitelů k^x , k^0 a nelze je pokládat za součinitele pohotovosti podle vztahu (1.80).

Předpoklad, že zkratový a nezkratový poruchový stav se navzájem vylučují lze matematicky vyjádřit vztahem:

$$k^x \cdot k^0 = 0 \quad (1.93)$$

Za tohoto předpokladu a vztahů (1.91) a (1.92) získáme kontrolní vztah:

$$K = K^0 \cdot K^x \quad (1.94)$$

a další relace pro numerický výpočet:

$$K^x = K + k^0; \quad K^0 = K + k^x \quad (1.95)$$

Poruchovost spínacích přístrojů rovněž záleží na tom, v jakém systému a v kterém jeho místě vykonávají svou funkci. Důvodem jsou rozličné četnosti manipulací a různé elektrické poměry (zkratové proudy, zotavené napětí apod.), případně i jiné provozní podmínky. Stanovit spolehlivostní ukazatele diferencovaně v závislosti na typu vypínače a na místě jeho funkčního nasazení je obtížné. Jedna z cest je stanovení spolehlivostních charakteristik přístrojů statistickými metodami na základě dlouhodobých pozorování skutečných provozů obdobných elektrických systémů (viz. údaje v tabulce č. 3). Druhý možný způsob vychází z představy, že k poruše vypínače dochází především při zapínání a vypínání. Pro určitý typ vypínače lze stanovit na základě experimentu nebo pozorování skutečného provozu pravděpodobnost poruchy:

$$P = \lim_{\bar{m} \rightarrow \infty} \frac{S}{\bar{m}} \quad (1.96)$$

kde:

S ... počet manipulací neúspěšných, kdy vznikla porucha

\bar{m} ... celkový počet manipulací

Známe-li ve sledovaném období střední hodnotu počtu manipulací vypínače m_s a střední počet poruch S_s , je pravděpodobnost poruchy:

$$P_s = \frac{S_s}{m_s} = \frac{1}{T_p \cdot m_s} \quad \text{a z toho vyplývá:} \quad (1.97)$$

$$T_p = \frac{1}{P_s \cdot m_s}$$

Tabulka 2

Informativní spolehlivostní ukazatelé zařízení ve vlastní spotřebě elektráren

| Z a ř í z e n í | Intenzita poruch $\lambda \cdot 10^6$ | Intenzita oprav μ | Součinitel poruchovosti | | | Součinitel pohotovosti K |
|---|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | | | Celkový k | Zkratový k ^x | Nezkratový k ^o | |
| Transformátor blokové vlastní spotřeby | 1,50 | 0,005 | $0,300 \cdot 10^{-3}$ | - | - | 0,999700 |
| Transformátor společné vlast.spotřeby (regulační) | 2,15 | 0,005 | $0,430 \cdot 10^{-3}$ | - | - | 0,999570 |
| Transformátor vn/vn | 1,00 | 0,100 | $0,100 \cdot 10^{-4}$ | - | - | 0,999990 |
| Vypínač vvn | 15,00 | 0,030 | $0,500 \cdot 10^{-3}$ | $0,170 \cdot 10^{-3}$ | $0,330 \cdot 10^{-3}$ | 0,999500 |
| Odkojovač vvn | 5,00 | 0,050 | $0,100 \cdot 10^{-3}$ | $0,300 \cdot 10^{-4}$ | $0,700 \cdot 10^{-4}$ | 0,999900 |
| Generátorový vypínač | 11,20 | 0,080 | $0,140 \cdot 10^{-3}$ | $0,500 \cdot 10^{-4}$ | $0,900 \cdot 10^{-4}$ | 0,999860 |
| Vypínač vn | 3,00 | 0,250 | $0,120 \cdot 10^{-4}$ | $0,400 \cdot 10^{-5}$ | $0,800 \cdot 10^{-5}$ | 0,999988 |
| Odkojovač vn | 1,00 | 0,250 | $0,400 \cdot 10^{-5}$ | $0,150 \cdot 10^{-5}$ | $0,250 \cdot 10^{-5}$ | 0,999996 |
| Přípojnice vn | 1,00 | 0,003 | $0,330 \cdot 10^{-3}$ | - | - | 0,999670 |
| Kabel vn (100 metrů) | 0,10 | 0,050 | $0,200 \cdot 10^{-5}$ | $0,100 \cdot 10^{-5}$ | $0,100 \cdot 10^{-5}$ | 0,999998 |
| Turboalternátor | 12,00 | 0,020 | $0,600 \cdot 10^{-3}$ | - | - | 0,999400 |
| Dieselsoustrojí (trvalý provoz) | 700,00 | 0,006 | 0,104 | - | - | 0,896 |

kde :

P_s ... pravděpodobnost poruchy vypínače

Dosazením T_p do vztahů (1.83) určí se součinitel pohotovosti resp. poruchovosti. Podobně se určí střední doba opravy T_o .

V současné době nejsou k dispozici zcela vyhovující statistické údaje pro určení spolehlivostních charakteristik prvků užívaných ve vlastní spotřebě elektráren nebo v silnoproudých systémech podobného charakteru v elektrizační soustavě. Pro potřeby spolehlivostních analýz silnoproudých systémů vlastní spotřeby je možno používat informativní hodnoty ukazatelů v tabulce 3 , která byla zpracována kritickým výběrem ze zahraničních pramenů s respektováním československých zkušeností.

1.9.1 Modely k určování spolehlivosti systémů

Funkční vazby prvků , tvořících určitý systém jsou popsány funkčním schématem systému. Spolehlivostní blokové schéma znázorňuje zapojení prvků pro rozbor a výpočet spolehlivosti systému. Odvodí se z funkčního schématu pro definovanou poruchu.

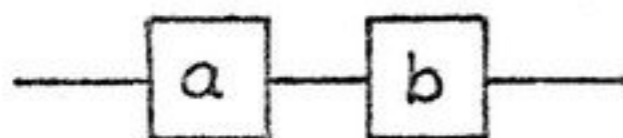
Každému prvku lze přiřadit náhodnou proměnnou veličinu X_i , která popisuje stav prvku :

$$X_i = \begin{cases} 1 \dots \text{prvek je v bezporuchovém stavu} \\ 0 \dots \text{prvek je v poruchovém stavu} \end{cases}$$

Veličina X_i je booleovská proměnná. Podobně lze též systému sestávajícímu z n prvků přiřadit booleovskou náhodnou proměnnou X_s pomocí booleovské funkce

$$X_s = \varphi (X_1, X_2 \dots , X_n) \quad (1.98)$$

Při seriovém spojení prvků v systému je třeba pro bezporuchový stav systému bezporuchovost všech prvků tohoto systému. Má-li systém l prvků v serií zapojených dle obr. 1.53 je Booleova funkce, popisující stav systému vyjádřena vztahem :



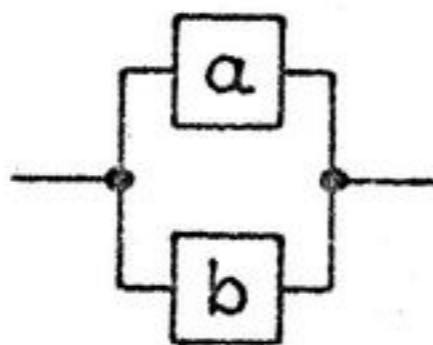
$$X_s = \prod_{i=1}^l X_i \quad (1.99)$$

Obr. 1. 53. Seriové zapojení

Systémy, které přecházejí do poruchového stavu jen při současném poruchovém stavu všech n prvků systému se nazývají paralelní (obr. 1.54) .

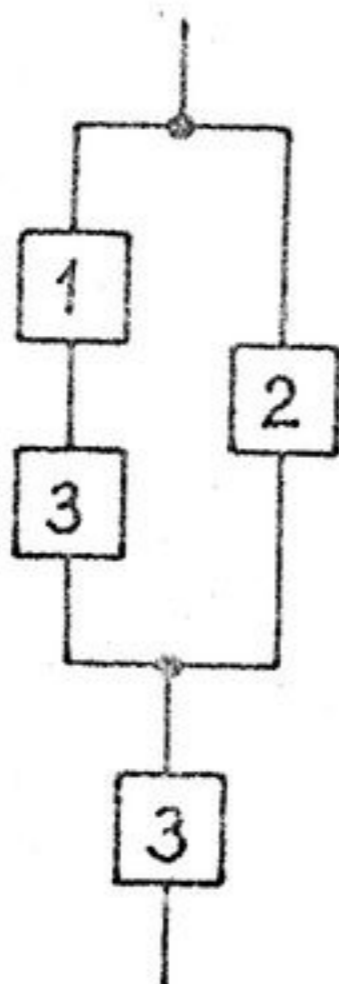
Booleova funkce popisující stav tohoto systému je vyjádřena vztahem :

$$X_s = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - X_k) \quad (1.100)$$



Obr. 1.54. Paralelní zapojení

V obr. 1.55 je uveden příklad spolehlivostního blokového schéma systému, pro které je provedena aplikace vztahů (1.99) a (1.100) .



Funkce stavu systému:

$$X_s = [1 - (1 - X_1 X_3) (1 - X_2)] X_3$$

Po vynásobení:

$$X_s = X_1 X_3^2 + X_2 X_3 - X_1 X_2 X_3^2 \quad (1.101)$$

Po úpravě:

$$X_s = X_1 X_3 + X_2 X_3 - X_1 X_2 X_3 \quad (1.102)$$

Součinitel pohotovosti:

$$K_s = K_1 K_3 + K_2 K_3 - K_1 K_2 K_3 \quad (1.103)$$

Obr. 1. 55. Spolehlivostní blokové schéma systému

Funkce stavu systému podle vztahu (1.101) má tvar polynomu. Lze prokázat, že v mnohočlenu se vyskytují obecně Booleovy proměnné, příslušné opakujícím se prvkům, v první mocnině ale i ve vyšších mocninách, přičemž exponent má nejvyšší hodnotu danou počtem opakování toho kterého prvku. O mocninách Booleovy proměnné platí základní vztah:

$$X_1^p = X_1 \quad (1.104)$$

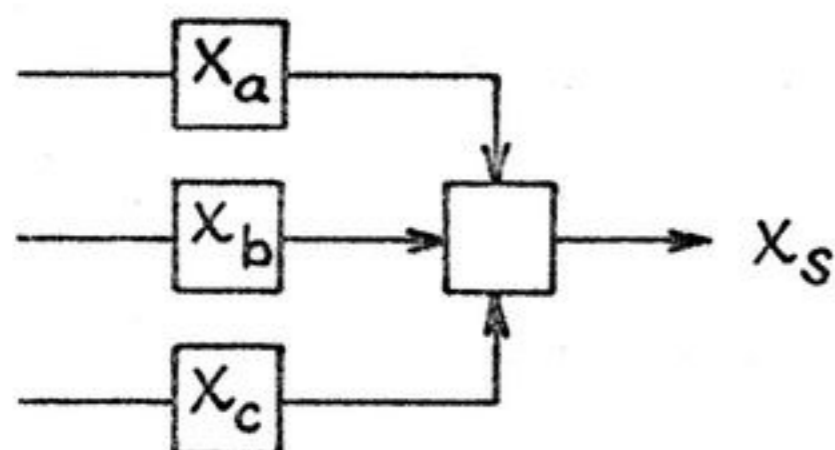
kde :

p ... přirozené číslo, vycházející z vlastností čísel 1,0 ($1^p = 1$; $0^p = 0$).

Při uvažování vztahu (1.104) můžeme upravit rovnici (1.101) do jednoduššího tvaru (1.102) .

Jako další příklad je uveden systém " 2 ze 3 ", např. používaný v zabezpečovacích systémech jaderných elektráren. Při tomto, částečně redundantním systému musí být pro funkci systému bezporuchové alespoň dva podsystémy. Podle obr. 1.56 může se majoritní člen skládat ze sumátoru a za ním připojeného relé.

$$X_s = 1 - (1 - X_a X_b)(1 - X_b X_c)(1 - X_a X_c)$$



Obr. 1.56. Technické blokové schéma systému " 2 ze 3 "

Stav každého smíšeného systému složeného z n stochasticky nezávislých dvoustavových prvků, ať jeho spolehlivostní blokové schéma je jakékoliv (bez opakování, nebo s libovolným počtem vícenásobně se opakujících prvků), je popsán Booleovou funkcí X_s , která má tvar mnohočlenu, kde každý člen obsahuje náhodné proměnné prvky X_i v první mocnině.

Funkci X_s popisující stav systému (1.98) můžeme napsat v obecném tvaru, který je vhodný pro aplikaci na počítači:

$$X_s = \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n c_{ijk} X_i X_j X_k + \dots$$

kde $a_i, b_i \dots$ koeficienty mnohočlenu

(1.105)

Přechod z vyjádření stavu systému Booleovou funkcí na vyjádření jeho pohotovosti převedeme tak, že do výrazu pro funkci X_s dosadíme za jednotlivé Booleovy proměnné prvky X_i příslušné součinitele pohotovosti K_i .
Příklad je v obr. 1.55, vztah (1.103).

Výpočet součinitele poruchovosti z dualitní funkce stavu systému

Pro praktické výpočty je účelné každému prvku systému přiřadit jinou náhodnou proměnnou veličinu Y_i , která rovněž popisuje stav prvku :

$$Y_i = \begin{cases} 1 \dots \text{prvek je v poruchovém stavu} \\ 0 \dots \text{prvek je v bezporuchovém stavu} \end{cases}$$

Stav systému, který je složen z n prvků, je popsán Booleovou funkcí Y_s :

$$Y_s = \psi (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \quad (1.106)$$

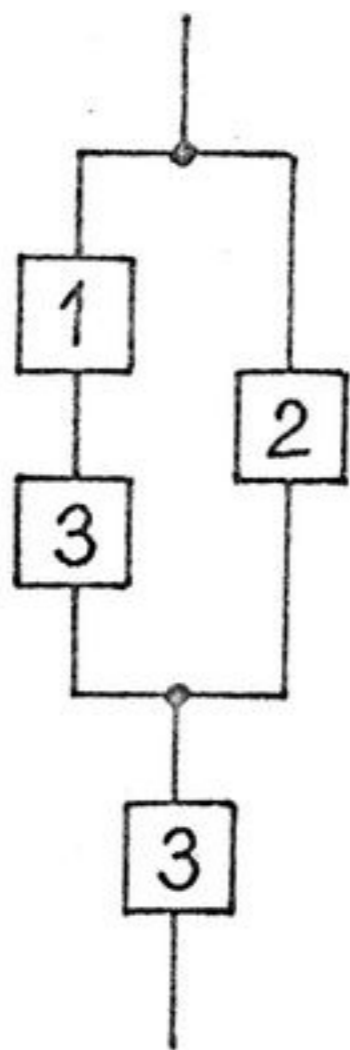
Systemy, které jsou v poruchovém stavu jen v tom případě, že v poruchovém stavu jsou všechny jejich prvky je paralelním systémem. Booleova funkce popisující stav paralelního systému složeného z n prvků je určena vztahem:

$$Y_s = \prod_{i=1}^n Y_i \quad (1.107)$$

Pro seriové systémy, které přecházejí do poruchového stavu poruchou i jen jediného svého prvku platí:

$$Y_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i) \quad (1.108)$$

V obr. 1.57 je uveden příklad spolehlivostního blokového schéma systému, pro které je provedena aplikace vztahů (1.107) a (1.108).



Funkce stavu systému: (1.109)

$$Y_s = 1 - \{ 1 - [1 - (1 - Y_1)(1 - Y_2)] Y_3 \} (1 - Y_3)$$

Po vynásobení: (1.110)

$$Y_s = Y_3 + Y_1 Y_2 + Y_2 Y_3 - 2 Y_1 Y_2 Y_3 - Y_2 Y_3^2 + Y_1 Y_2 Y_3^2$$

Po úpravě: (1.111)

$$Y_s = Y_3 + Y_1 Y_2 - Y_1 Y_2 Y_3$$

Součinitel poruchovosti: (1.112)

$$k_s = k_3 + k_1 k_2 - k_1 k_2 k_3$$

Obr. 1.57. Spolehlivostní schéma

Podobně jako v předchozím (při výpočtu součinitele pohotovosti) je stav každého smíšeného systému složeného z n stochasticky nezávislých dvoustavových prvků, ať je spolehlivostní schéma jakékoliv (bez opakování, nebo s libovolným počtem vícenásobně se opakujících prvků) popsán Booleovou funkcí Y_s , obsahující prvky Y_i v první mocnině.

Funkci Y_s , popisující stav systému (1.106) lze vyjádřit v obecném tvaru:

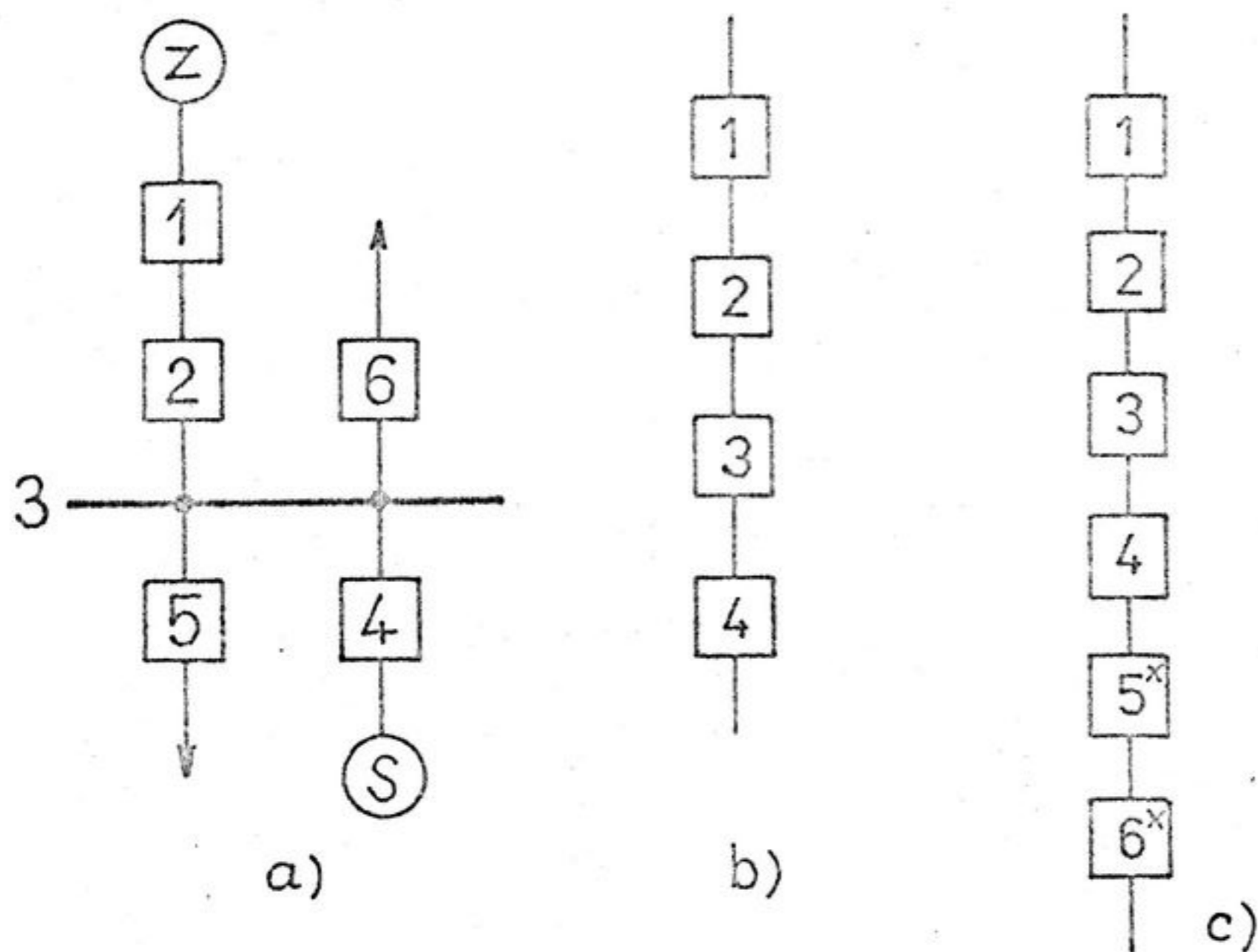
$$Y_s = \sum_{i=1}^n A_i Y_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n B_{ij} Y_i Y_j + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n C_{ijk} Y_i Y_j Y_k + \dots \quad (1.113)$$

Koeficienty A, B, C, \dots se určí ze systému lineárních rovnic, které vznikají postupným dosazováním hodnoty 1 za hodnoty proměnných Y v systémové rovnici (1.106). Metoda postupného určování koeficientů je zvláště výhodná pro aplikaci na počítač.

Součinitel poruchovosti systému složeného z n stochasticky nezávislých dvoustavových prvků se určí, když do vztahu (1.113), který popisuje stav systému Booleovou funkcí Y_s se dosadí za jednotlivé proměnné prvků Y_i příslušné součinitele poruchovosti k_i . Příklad je v obr. 1.57 vztah (1.112).

1.9.2. Aplikace dvojího charakteru poruchovosti elektrických prvků ve spolehlivostním schématu

Rozdělení poruchových stavů elektrických prvků na poruchové stavy zkratové a nezkratové má technické důvody, které vyplývají z následujících příkladů. V obr. 1.58a) je funkční schéma přenosu elektrické energie, ze zdroje Z je napájen spotřebič S .



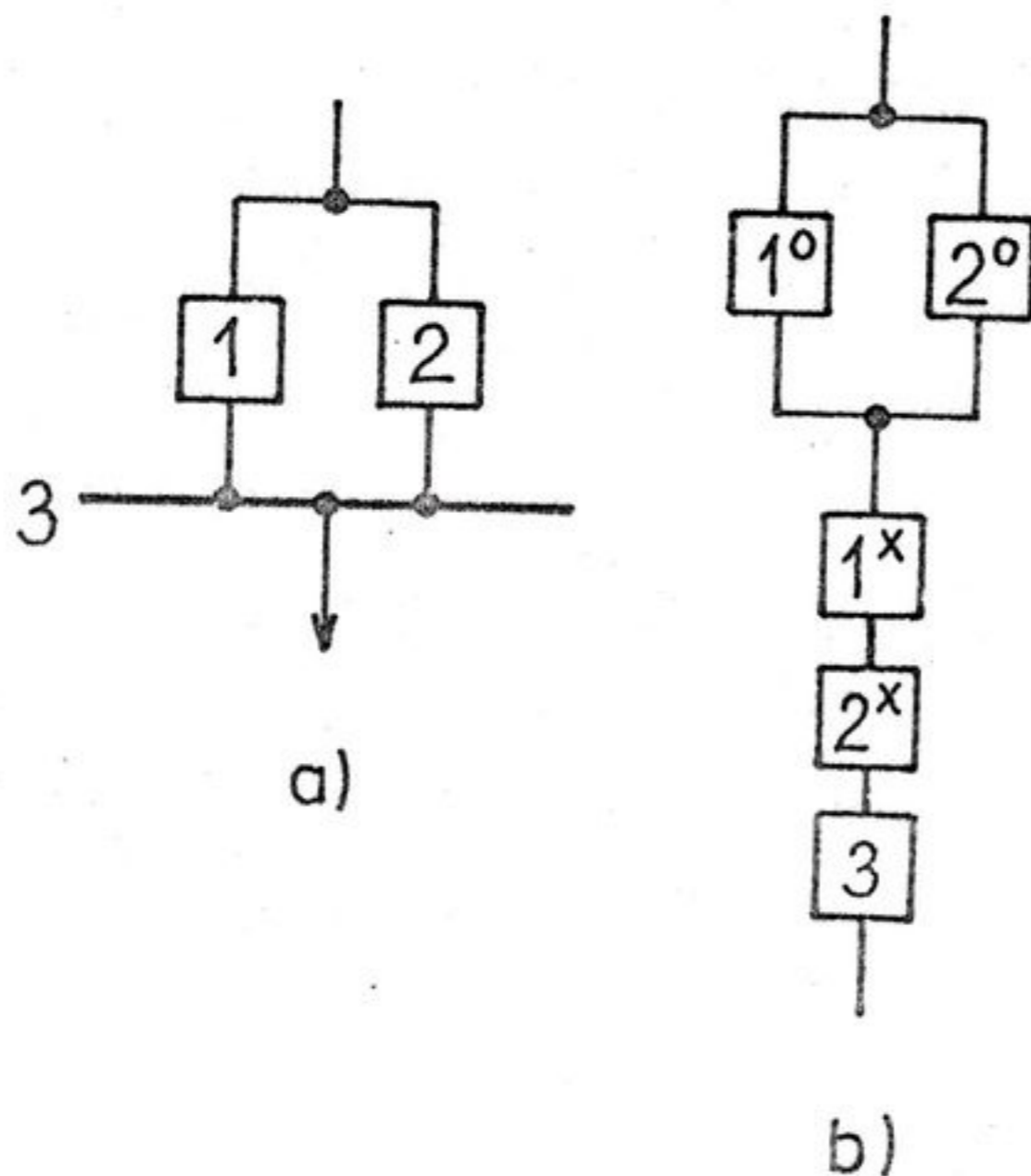
Obr. 1.58. Funkční schéma

Z počátku neuvažujeme odbočky s vypínači 5,6; za předpokladu stoprocentní spolehlivosti zdroje Z může dojít k poruchovému stavu systému, t.j. ztráty napájení spotřebiče S poruchami prvků 1,2,3,4. Je lhostejné, jestli půjde o poruchy zkratem nebo ztrátou elektrické vodivosti. Spolehlivostní schéma pro tento případ je v obr. 1.58b).

Správně musíme však respektovat odbočky s vypínači 5,6, protože k poruchovému stavu může dojít jakoukoliv poruchou prvků 1 až 4 a ještě navíc zkratem prvků 5 a 6. Zkrat na vypínačích 5,6 i když se vyskytne samostatně, znemožní existenci napětí na přípojnicích 3.

Ztráta elektrické vodivosti prvku 5 by sice vyvolala poruchový stav nějakého spotřebiče (mimo dosah sledovaného schema), ale nevede ke ztrátě napětí na spotřebiči S. Obdobná úvaha platí o vypínači 6. Příslušné spolehlivostní schema je v obr. 1.58c)

Pro další výklad je na obr. 1.59a) uvedeno funkční schema napájení přípojnic 3 (rozváděče) dvěma trasami s prvky 1 a 2.



Obr. 1.59 Schema napájení přípojnic

Poruchový stav systému (beznapěťový stav na přípojnicích 3) může být vyvolán jakoukoliv poruchou přípojnic 3, semostatným či současným zkratem prvků 1 nebo 2 a současným poruchovým stavem nezkratovým prvků 1,2. Příslušné spolehlivostní schema je v obr. 1.59b)

Aplikace zkratového a nezkratového poruchového stavu prvků ve spolehlivostním schématu se řídí těmito pravidly :

- Pokud je to možné, je prvek zastoupen součinitelem celkové poruchovosti k nebo funkcí stavu Y .
- V některých případech musí být prvek, podílející se na přenosu energie v rámci systému representován dílčími součiniteli poruchovosti k^x , k^o příp. dílčími funkcemi stavu Y^x , Y^o .
- Pokud se v jednom spolehlivostním schématu vyskytuje kombinace k spolu s k^x nebo k spolu s k^o je nutno celkový součinitel poruchovosti k rozdělit na dílčí k^x a k^o (obdobně pro Y).
- Prvky, které se nezúčastní přenosu energie v rámci sledovaného systému, ale mohou svou zkratovou poruchou vyvolat poruchový stav systému, hodnotí se pouze zkratovým součinitelem poruchovosti k^x resp. funkcí stavu Y^x .

Matematické vyhodnocení spolehlivostního schématu s uvažováním dvojího poruchového stavu elektrických prvků vede k určitým problémům, které vyplývají z nereálnosti současných poruchových stavů zkratových a nezkratových téhož prvku. Pro spolehlivostní schema dle obr. 1.59b) odvodíme vztah pro součinitel poruchovosti systému k_s^o , který obsahuje členy se současným výskytem zkratové a nezkratové poruchovosti téhož prvku (např. $k_1^o k_1^x k_2^o$).

$$\begin{aligned}
k'_s &= k_1^x + k_2^x + k_3 - k_1^x k_2^x - k_1^x k_3 - k_2^x k_3 + k_1^0 k_2^0 + \\
&+ k_1^x k_2^x \cdot k_3 - k_1^0 \cdot k_2^0 \cdot k_3 - \\
&- k_1^0 k_1^x \cdot k_2^0 - k_1^0 k_2^0 k_2^x + k_1^0 k_2^x k_2^0 + k_1^0 k_1^x k_2^0 k_3 + \\
&+ k_1^0 k_2^0 k_2^x k_3 - k_1^0 k_1^x k_2^0 k_2^x k_3
\end{aligned}
\tag{ 1.114 }$$

Takto vypočítaný součinitel poruchovosti systému k'_s je menší než správná hodnota k_s ($k'_s < k_s$). Správnou hodnotu součinitele poruchovosti k_s nebo Y_s získáme vyloučením těch členů, které obsahují současný výskyt zkratového a nezkratového poruchového stavu jednoho a téhož prvku. Ve vztahu (1.114) jsou to všechny členy zapsané ve třetím a čtvrtém řádku, které se ve výpočtu nerespektují. Pokud by stav systému byl popsán funkcí stavu X_s , nesmí být vyloučeny členy obsahující součiny funkcí stavu zkratového a nezkratového prvků, protože nemají nulovou hodnotu (vyplývá ze vztahu 1.94).

1.9.3. Postup spolehlivostní analýzy systému

Pro spolehlivostní analýzu složitějších silnoproudých systémů jsou nutné znalosti technologických zařízení, řídicích a zabezpečovacích systémů a problematiky provozu.

- a/ Výchozím podkladem spolehlivostní analýzy je funkční schema zkoumaného systému, u kterého musí být přesně vymezena jeho hranice, rozsah a náplň. U analýzy systému vlastní spotřeby elektráren ukazuje se často účelným zahrnout do soustavy i zdroje vlastní spotřeby (síť, turboalternátory, dieselsoustroje). Náplní schematu jsou zpravidla silnoproudá zařízení, je však možno do sledovaného systému zahrnout i řídicí techniku a zabezpečovací zařízení.
- b/ Funkce systému vlastní spotřeby se mění podle provozních stavů bloků a elektrárny. Tyto varianty musí být pro výpočet definovány (normální provoz, spouštění, odstavení, poruchové stavy).
- c/ Na základě znalosti požadované funkce systému pro zadané funkční schema definovat poruchu.
- d/ Rozhodnout o volbě ukazatelů, pomocí kterých bude systém z hlediska spolehlivosti (poruchovosti, bezporuchovosti apod.) hodnocen. Doporučuje se na prvním místě součinitel poruchovosti a součinitel pohotovosti. Hodnotící ukazatele je možno rozšířit např. o střední dobu bezporuchového provozu a střední dobu oprav. Výpočet složitějších systémů se provádí na počítači.

2.1. Elektrotechnické zařízení elektráren

V této kapitole budou popsána nejdůležitější elektrotechnická zařízení elektráren jako jsou alternátory včetně budících soustav a transformátory. Volba jejich základních parametrů a uvedené provozní diagramy jsou zaměřeny na podmínky práce těchto strojů ve výrobních elektrické energie. Všechny stavy jsou uvažovány jako ustálené, přechodné stavy jsou řešeny v navazujícím předmětu " Přechodné jevy v elektrizační soustavě " .

2.1.1. Alternátory

Pro přeměnu mechanické energie turbin v tepelných a vodních elektrárnách na elektrickou energii, se používají téměř výhradně synchronní alternátory. Zásadně dělíme tyto stroje na turboalternátory a hydroalternátory, neboť jedním z určujících faktorů je druh pohánějící turbíny. Protože se oba typy podstatně odlišují svým konstrukčním návrhem i provozními parametry budou dále probrány odděleně.

Turboalternátory

Pro volbu alternátoru v konvenčních tepelných elektrárnách i jaderných elektrárnách se uplatňují převážně dvoupólové turboalternátory s válcovým rotorem pro 3000 ot/min při kmitočtu 50Hz nebo 3600 ot/min při kmitočtu 60Hz. Pro velmi velké jednotkové výkony bloků jaderných elektráren se uplatňují také čtyřpólové stroje pro 1500 ot/min. Vztah mezi počtem pólů, kmitočtem střídavého proudu a otáčkami :

$$p_p = \frac{60 \cdot f}{n} \quad (2.1)$$

kde :

p_p ... je počet pólových dvojic

n ... jsou otáčky rotoru [1/min]

f ... je kmitočet střídavého proudu [Hz]

Volba velikosti jmenovitého výkonu turboalternátoru je ovlivněna celou řadou faktorů, z nichž nejdůležitější jsou tyto :

a/ jmenovitý výkon technologické části elektrárny pro výrobu a přeměnu energie.

U konvenčních elektráren je zásadní otázkou pro volbu výkonu maximálně možný výkon parního generátoru pro monoblok, spalující méněhořadné uhlí. V ČSSR je převážná část výroby elektrické energie dosud zajišťována v konvenčních tepelných elektrárnách s bloky 110, 200 MW a jedním blokem 500 MW.

U jaderných elektráren se provádí volba jmenovitého výkonu alternátoru podle tepelného výkonu reaktoru. V současně provozovaných a budovaných elektrárnách s reaktory VVER-440 pracují dvě turbosoustrojí o výkonu à 220 MW v bloku s jedním reaktorem ; u další generace našich jaderných elektráren s reaktory VVER-1000 je monoblokové uspořádání, pro jeden reaktor pracuje jedno turbosoustrojí; obecně se dá tedy konstatovat, že výkon alternátoru se přizpůsobuje celkovému koncepčnímu pojetí výroby elektrické energie.

b/ Výrobní a dopravní možnosti. Při výrobě alternátorů jsou důležité otázky zavedení a osvojení seriové výroby určitého typu stroje. Docílení mezních výkonů alternátorů a souvisejících zařízení je omezeno také vahou a rozměry jednotlivých částí alternátoru a s tím souvisejících manipulačních a přepravních možností přímo ve výrobních závodech i po trase do místa instalace. Důležitou otázkou jsou také možnosti výroby.

c/ Konstrukční a technologické otázky.

Vzhledem k výrobním, materiálovým a dopravním možnostem není možné zvětšovat aktivní objem stroje úměrně s výkonem. Proto při přechodu k větším výkonům roste využití aktivního materiálu, v malém objemu se koncentrují vysoké ztráty a proto musí být použity účinné způsoby chlazení. Od menších strojů chlazených vzduchem se u větších jednotkových výkonů přešlo na chlazení vodíkem, vodíkem a vodou až celovodním chlazením.

Elektromagnetické využití stroje je charakterizováno Essonovým činitelem :

$$c = \frac{S}{d^2 \cdot l \cdot n} \quad (2.2)$$

| | |
|--|---------|
| kde : S je zdělnivý jmenovitý výkon stroje | [kVA] |
| d je průměr vrtání statoru | [m] |
| l je délka aktivní části železa | [m] |
| n jsou jmenovité otáčky | [1/min] |

Uvedený Essonův činitel je také úměrný součinu měrného proudového zatížení stroje a indukci ve vzduchové mezeře. Protože využití současně používaných magnetických materiálů nedovoluje podstatné zvýšení indukce, je možné zvýšit využití stroje vyšším proudovým zatížením. Například u stroje 235 MVA je proudové zatížení větší o 30 % než u stroje 125 MVA. Jmenovité napětí stroje roste (při respektování technicko-ekonomických aspektů) s jmenovitým výkonem , zvětšuje se tloušťka izolace statorového vinutí a přes určitou výkonovou hranici již nelze odvést při přijatelném oteplení ztráty z mědi přes izolaci vinutí statoru. Proto je uplatněno u strojů velkých jednotkových výkonů přímé vodní chlazení vinutí statoru, které vykazuje značné provozní výhody . Vysoké využití stroje, umožněné tímto moderním chladičím systémem přineslo s sebou výhody v malých rozměrech o nízké váze stroje, materiálových úsporách a menších nárocích na výrobu, montážní a zvedací zařízení. Relativní zvýšení ztrát je u těchto strojů možno omezit vhodnou kombinací plných a dutých vodičů. Ztráty v železe byly zmenšeny použitím orientovaných plechů při snížené tloušťce. Přídavné ztráty se omezují použitím nemagnetických materiálů pro čelní prostory statoru a použitím masivní měděné stínicí desky na odstínění čelního rozptylového toku.

d/ Pořizovací náklady.

Cena 1 kW výkonu alternátoru a velikost poměrných ztrát jsou úměrné čtvrté odmocnině jmenovitého výkonu. Proto je účelné budovat bloky velkých jednotkových výkonů neboť i pořizovací náklady a hospodárnost provozu ostatních výrobních zařízení jsou obvykle rovněž výhodnější.

e/ Účinník - $\cos \varphi$ souvisí s volbou jmenovitého jalového výkonu alternátoru, který je dán potřebami elektrizační soustavy. Při vyvedení výkonu elektrárny do nadřazené sítě elektrizační soustavy se pak alternátory podílejí svými jalovými výkony na řízení napětí a rozdělování jalového zatížení ve větvích a uzlech soustavy.

Při větším podílu výroby jalové energie v alternátoru rostou požadavky na dimenzování budícího vinutí a celého tělesa rotoru. Mezní průměr rotoru určuje dovolené mechanické namáhání zubů a obručí rotoru odstředivými silami. Zvětšení výkonu lze pak dosáhnout prodloužením aktivní délky rotoru, která je ale omezena opět mechanickými parametry, jako jsou vlastní kmity rotoru při kritických otáčkách a podobně. Obecně lze konstatovat, že u alternátorů menších výkonů se volí zpravidla menší účinník ($\cos \varphi < 0,8$), pro alternátory větších jednotkových výkonů bývá účinník větší ($\cos \varphi > 0,8$).

Volba výkonu alternátoru v [MVA] vychází z řady výkonů podle ČSN 350200 :

10; 12,5 ; 16; 20; 25; 31,5 ; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 235; (259); (588).

Chlazení alternátorů

Se stoupajícím využitím strojů větších výkonů silně rostou ztráty na jednotku objemu aktivního materiálu a v důsledku toho se zkracují i tepelné časové konstanty. S dříve uplatňovaným chlazením vzduchem (asi do výkonu 50 MW) nelze při vyšším využití vystačit. Proto se pro větší výkony přešlo k chlazení vodíkem a k přímému chlazení statorového vinutí vodou. Pro zvlášť velké výkony se uplatňuje chlazení vodou, jak statorového tak i rotorového vinutí.

Vodíkové a vodní chlazení turboalternátorů

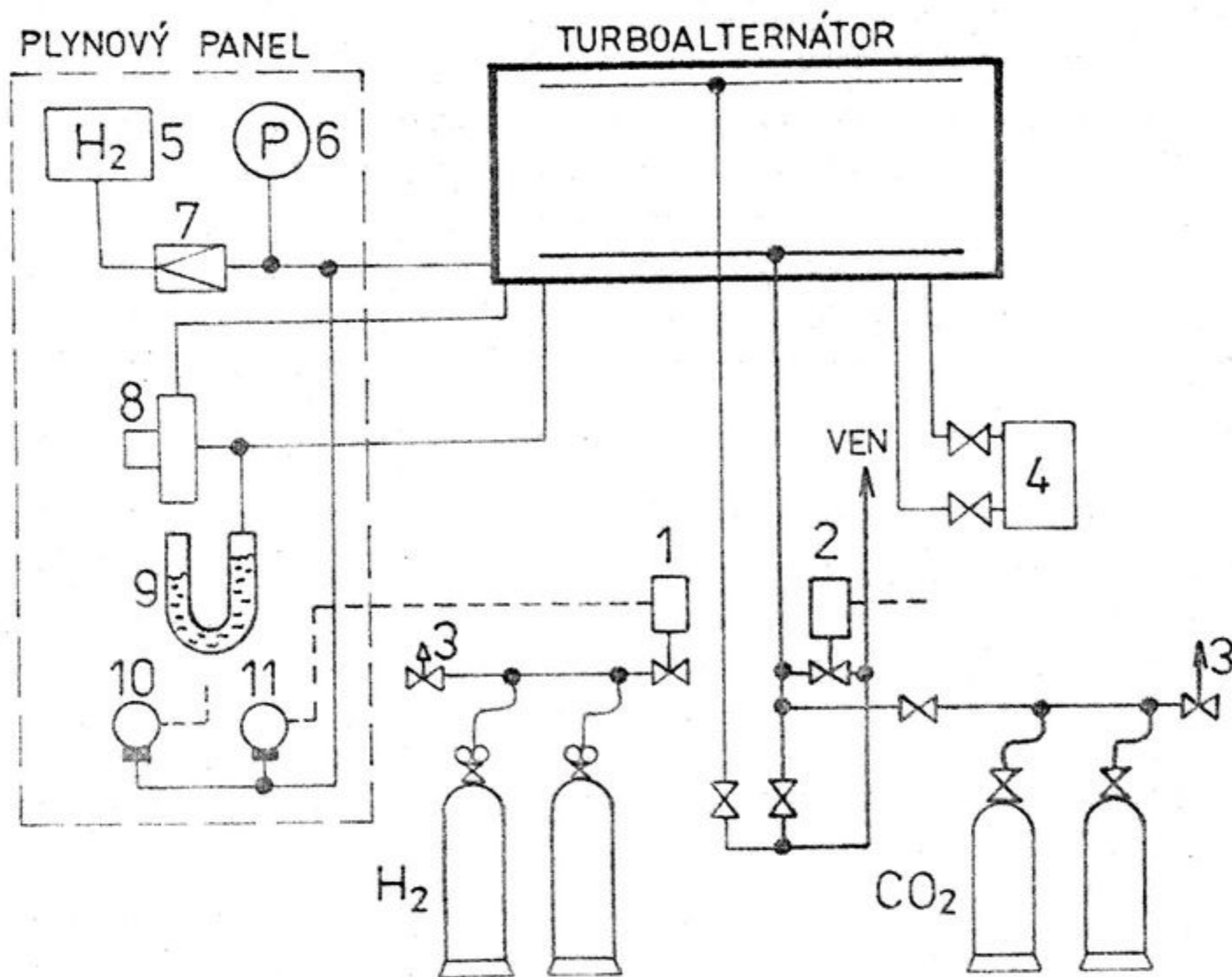
Vodíkové a vodní chlazení turboalternátorů je zajišťováno speciálním příslušenstvím, které se dělí na :

- a/ plynové hospodářství,
- b/ hospodářství těsnícího oleje,
- c/ hospodářství statorové chladicí vody.

a/ Plynové hospodářství

Zařízení plynového hospodářství umožňuje neplnění stroje vodíkem, udržuje jeho předepsanou čistotu a tlak ve stroji, a zabezpečuje krytí ztrát plynu únikem. Příznivé vlastnosti vodíku přispěly k tomu, že je nejčastěji používaným plynem pro chlazení velkých rychloběžných elektrických strojů. Nepříznivou vlastností vodíku však je skutečnost, že se vzduchem tvoří třaskavou směs a to ve velmi širokém rozsahu koncentrace od 4% do 75 % H_2 ve vzduchu. Proto čistota vodíku ve stroji nesmí nikdy klesnout na horní mez výbušnosti a je přirozenou snahou udržovat ji na co nejvyšší úrovni. Zhoršováním čistoty vodíku klesá i jeho chladicí účinek a stoupají ventilační ztráty. Dobrá provozní čistota vodíku se pohybuje kolem 98 %, čistota 92 % H_2 je signalizována jako čistota minimální, při níž je nutné zvyšovat čistotu náplně ve stroji čistým vodíkem. Výbušnost směsi vodíku se vzduchem nedovoluje, aby se při plnění stroje vytlačoval vzduch přímo vodíkem. Je bezpodmínečně nutné naplnit stroj nejprve inertním plynem a teprve potom do stroje napouštět vodík. Jako inertního plynu se používá kysličník uhličitý. U strojů, které pracují s tlakem vodíku blízkým atmosferickému, nesmí dojít k podtlaku ve stroji, aby se případnými netěsnostmi nenasával vzduch do stroje.

K plnění alternátoru se používá elektrolytického vodíku o minimální čistotě 99,5% H_2 , který se dodává v lahvích nebo se může vyrábět v elektrolyzérových vyvíječích na místě. U strojů velkých jednotkových výkonů se pracuje s provozním přetlakem kolem 300 až 400 kPa, kdy nastávají nejpříznivější podmínky pro chlazení stroje. Zjednodušené schéma plynového hospodářství turboalternátoru je uvedeno na obr. 2.1.



obr. 2.1. Plynové hospodářství alternátoru

kde značí :

1. Přepouštěcí ventil dálkově ovládaný
2. Vypouštěcí ventil dálkově ovládaný
3. Pojistný ventil
4. Vysoušeč vodíku
5. Analyzátor vodíku
6. Měření tlaku
7. Regulátor konstantního průtoku
8. Měřicí ventilátor
9. Měření čistoty plynů při plnění
10. Signalizace minimálního a maximálního tlaku ve stroji
11. Tlakový spinač pro automatické připouštění vodíku do stroje.

Vodík se obvykle připouští do stroje buď ručním řízením nebo automaticky. Tlak vodíku v lahvích, který dosahuje hodnot 15MPa se redukuje na 400 kPa a vede se k dálkově ovládaným ventilům. Někdy se používá ještě dalšího pomocného plynojemu, aby se zabránilo úniku vodíku z lahví, způsobeného netěsností ventilů lahví, které musí být při automatickém provozu trvale otevřeny. V elektrárnách s více stroji velkých výkonů je i výhodnější centrální rozvod plynů, kdy všechny stroje jsou vzájemně propojeny. Plnění nebo vyprazdňování turboalternátoru se provádí po jeho odpojení od ostatních strojů pomocí záložního napájecího potrubí.

Kontrolní plynový panel je umístěn v blízkosti rozvodu plynů a je vybaven přístroji pro trvalé sledování čistoty a tlaku vodíku ve stroji při normálním provozu i pro plnění vodíkem a vyprazdňování za použití CO_2 .

K měření čistoty vodíku se používá analyzátorů H_2 , které pracují na principu sledování různé tepelné vodivosti vodíku a vzduchu.

Vysoušení vodíku v turboalternátoru je zajištěno dvěma vysoušeči s náplní silikagelu. Regenerace náplně se provádí za provozu odpařením pohlčené vody při zastavení průtoku H_2 vysoušečem.

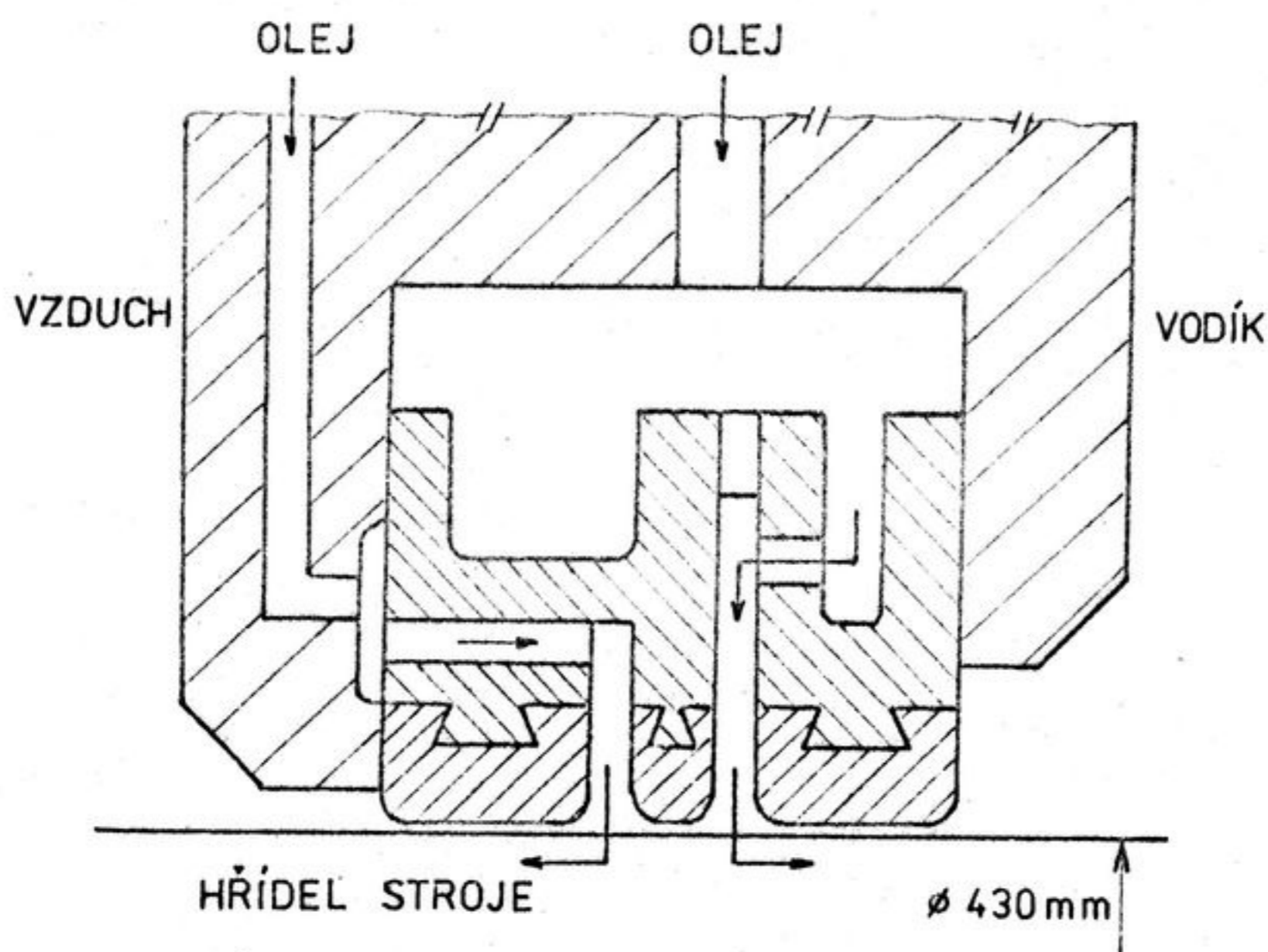
Rotorové ucpávky a hospodářství těsnícího oleje

Rotorové ucpávky utěsňují prostor alternátoru naplněný vodíkem v místech, kde rotor vystupuje z vodíkového prostředí. K utěsnění se používá olejového filmu, který vyplňuje prostor mezi točící se hřídelí a stojící ucpávkou. Protože má olej v ucpávce vyšší tlak než je tlak vodíku v alternátoru, nemůže vodík unikat ucpávkou ze stroje do okolí. Absorbce plynů v kapalinách způsobuje, že se olej po průchodu ucpávkou nasycuje uvnitř alternátoru vodíkem a na vnější straně ucpávky vzduchem. V dalším oběhu se olej promísí a při dalším čerpání do ucpávek se absorbovaný vzduch může uvolňovat ve vnitřním prostoru alternátoru a znečišťovat vodík. Potom je nutno při dosažení spodní hladiny dovolené čistoty H_2 alternátor proplachovat čistým vodíkem. Zanášení vzduchu do stroje se může výrazně omezit vakuováním těsnícího oleje.

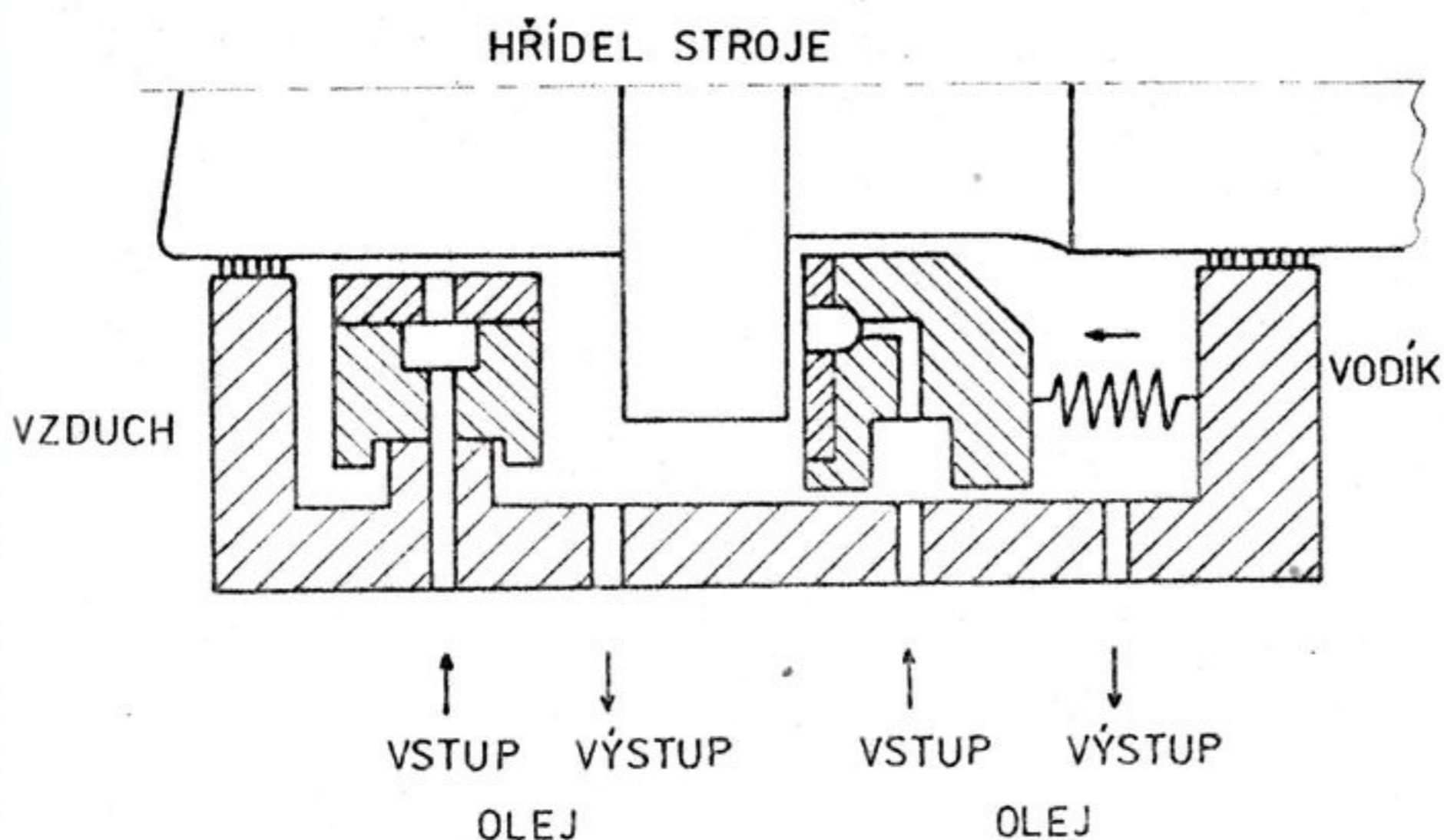
Nejvýhodnější variantou z hlediska provozu se jeví systém používající dvou těsnících olejů, pro vodíkovou a vzduchovou stranu navzájem oddělených.

Utěsnění hřídele rotoru je možné provést dvěma způsoby :

- a/ válcovou, radiální ucpávkou
(Provedení válcové radiální ucpávky je znázorněno na obr. 2.2.)
- b/ čelní, axiální ucpávkou
(Provedení čelní axiální ucpávky je znázorněno na obr. 2.3.)



Obr. 2.2. Válcové radiální ucpávka



Obr.2.3. Čelní axiální ucpávka

Válcové ucpávky jsou provozně spolehlivější zejména při najíždění a při odstavení stroje s ohledem na axiální posuny rotoru vlivem tepelných dilatací. Při normálním provozu však vyžadují vakuování těsnícího oleje. U čelní axiální ucpávky je možné omezit vnikání oleje do vodíkového prostoru a tím i zmenšení množství vzduchu zanášeného do vnitřního prostoru stroje.

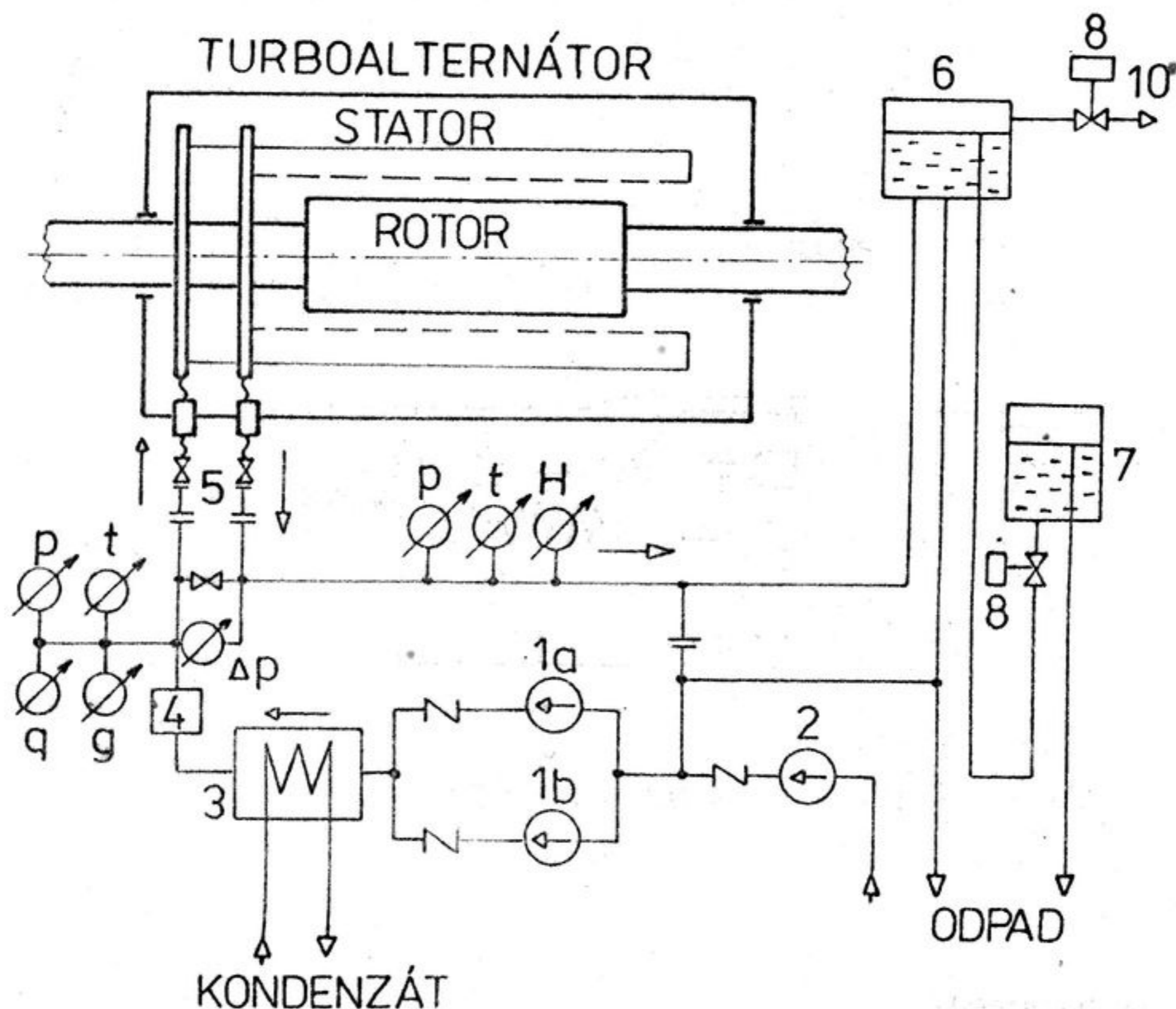
Hospodářství statorové chladicí vody

Zařízení v hospodářství statorové chladicí vody zajišťuje průtok vody dutými statorovými vodiči v dostatečném množství a její odpovídající kvalitě. K chlazení se používá vody kondenzátu o vodivosti 2 až $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ při provozních teplotách.

Vodní hospodářství alternátoru tvoří uzavřený okruh, ve kterém je oběh chladicí vody kondenzátu zajišťován zvláštním čerpadlem, v němž se potřebná čistota vody udržuje průtokem přes ionexové filtry v okruhu, nebo proplachováním čistou vodou o elektrické vodivosti menší než $1,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ při 20°C .

Základní schéma vodního okruhu alternátoru je znázorněno na obr. 2.4.

Vodní okruh je vybaven pracovním a záložním čerpadlem, odtud je chladicí voda (kondenzát turbíny) vedena přes chladič a mechanický filtr do stroje.



Obr. 2.4. Základní schéma vodního okruhu alternátoru

- kde značí :
- 1.a pracovní čerpadlo
 - 1.b záložní čerpadlo
 - 2. podévací čerpadlo
 - 3. chladič
 - 4. mechanický filtr
 - 5. vyjímatelné vložky
 - 6. vyrovnávací nádoba

- 7. sifon
- 8. automatický uzavírací ventil
- 9. voda ze stanice směsných filtrů
- 10. k vývěvě

- Měření :**
- p tlak (Δp - diferenciální měření tlaku)
 - t teplota
 - q množství
 - g měrná vodivost
 - H₂ měření přítomnosti (vnikání) vodíku do chladicího okruhu

Podtlakem vytvořeným ejektorovou vývěvou se ve vyrovnávací nádobě voda zbavuje pohlcených plynů. Voda je nasycena převážně vodíkem, který se do ní dostává porézností materiálů použitých uvnitř alternátoru.

Měření izolačního stavu statorového vinutí se provádí bez vypuštění vody z vinutí tak, že se vinutí odpojí od ostatního uzemněného okruhu pomocí vyjímatelných vložek na vstupní části chladicího okruhu do stroje.

Při větších netěsnostech chladicího okruhu uvnitř stroje může vnikat vodík do vodního systému a vytvářet přetlak, který by mohl způsobit únik vodíku ze stroje na nežádoucích místech.

Hydroalternátory

U hydroalternátorů určují výkon a otáčky stroje parametry vodního díla a podle nich zvolený typ turbíny. U vodních turbín, které pracují s nižšími otáčkami vycházejí podle vztahu (2.1) vícepólové hydroalternátory, s velkými průměry rotorů.

Hydroalternátory mají rotory s vyniklými póly, které mají tyče a spojovací kruhy tlumiče pro potlačení vlivu nesouměrných zkratů a zatížení a pro zlepšení parametrů určujících chování stroje v podmínkách statické a dynamické stability. Chlazení hydroalternátorů se provádí cirkulací vzduchu, která se vytváří točením vlastního rotoru a působením ventilátoru.

Ve vodních elektrárnách se instalují hydroalternátory se svislým nebo vodorovným hřídelem. Tuto koncepci určuje druh použité vodní turbíny a celkové provedení vodního díla.

Rotor je u čtyřpólových a šestipólových strojů vykován z jednoho kusu s hřídelem ze speciální ocele. U vícepólových strojů je magnetové kolo z ocelolity, pro velké obvodové rychlosti je rotor složen z vykováných desek. Pólové nástavce se montují na rotor na rybinu nebo kladiva. Póly jsou lištěné, lamelované, složené v jeden celek slisováním z ocelového plechu s dobrými magnetickými vlastnostmi. V pólových nástavcích jsou tyče tlumiče spojené kruhy, které tvoří uzavřenou klec.

Tlumič se uplatňuje kromě výše uvedených stavů také při asynchronním rozběhu stroje. Na hřídeli rotoru jsou umístěny ventilátory pro oběh chladicího vzduchu vinutí pólů, čel statorového vinutí a oběh ve ventilačních kanálech statorových plechů. Ve vodních elektrárnách jsou větší jednotkové výkony hydroalternátorů provedeny se svislým hřídelem. Závěsná konstrukce a segmentové závěsné ložisko jsou navrženy na celkovou hmotnost rotoru alternátoru, budiče a turbíny. Kostra statoru je svařovaná a pro snazší dopravu dělená na dva až čtyři díly.

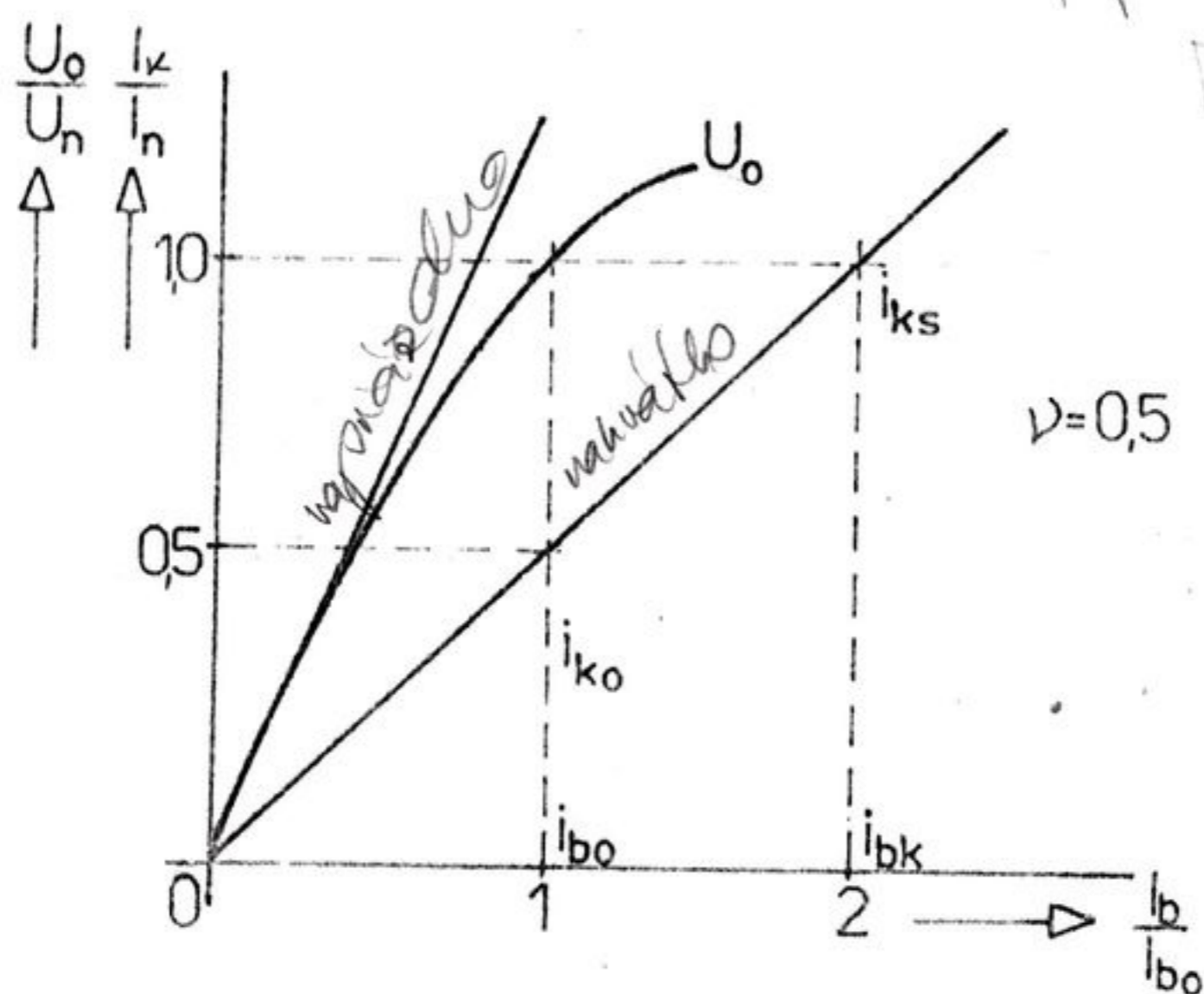
Volba napětí alternátoru

U alternátorů menších výkonů, zejména u tepláren a závodních elektráren, kde alternátor pracuje přímo na přípojnice se volí napětí podle jmenovité řady a to 6,3 kV.

U strojů větších výkonů je jmenovité napětí dáno maximálním výkonovým využitím alternátorů a určuje jej především izolace statorového vinutí a její mechanické a elektrické vlastnosti.

| | | | |
|----------------|--------|-----|-----------------------|
| Např. u strojů | 50 MW | ... | $U_n = 6,3$ kV |
| čs.výroby jsou | 110 MW | ... | $U_n = 13,8$ kV |
| tato jmenovitá | 200 MW | ... | $U_n = 15$ kV (15,75) |
| napětí : | 500 MW | ... | $U_n = 20$ kV |

V obr. 2.1. jsou uvedeny provozní charakteristiky alternátoru, charakteristika naprázdno a charakteristika nakrátko.



1 ..poměrné proudové hodnoty

Obr. 2.5. Charakteristiky alternátoru

Z charakteristik lze určit zkratový poměr ν , což je poměr 3-pólového zkratového proudu alternátoru I_{ko} při buzení naprázdno $-I_{bo}$ ku jmenovitému proudu alternátoru I_n .

$$\nu = \frac{I_{ko}}{I_n} = i_{ko} = \frac{I_{bo}}{I_{bk}} = \frac{1}{i_{bk}} \quad (2.3)$$

Dále je podle obr. 2.5 patrné, že zkratový poměr je číselně roven poměrnému zkratovému proudu i_{ko} , nebo nepřímo úměrný poměrnému budicímu proudu nakrátko i_{bk} .

Pro konkrétně uvedené charakteristiky na obr. 2.1. je zkratový poměr:

$$\nu = 0,5, \quad i_{ko} = 0,5, \quad i_{bk} = 2.$$

Synchronní reaktance alternátoru se určí ze vztahu:

$$x_d = \frac{e_v}{I_{ko}} = \frac{e_v}{\nu} = \frac{1,1}{0,5} = 2,2$$

Z hlediska provozu alternátoru je výhodnější větší hodnota zkratového poměru, neboť přináší tyto výhody:

- zvýšení rezervy stability paralelního provozu,
- zmenšení vlivu reakce kotvy, což přináší snížení velikosti přechodného proudu v rotoru při zkratu.

Na druhé straně větší zkratový poměr ovlivňuje konstrukci a zvyšuje cenu alternátoru, neboť z tohoto důvodu musí být větší vzduchová mezera a zároveň větší magnetizační výkon budicího vinutí.

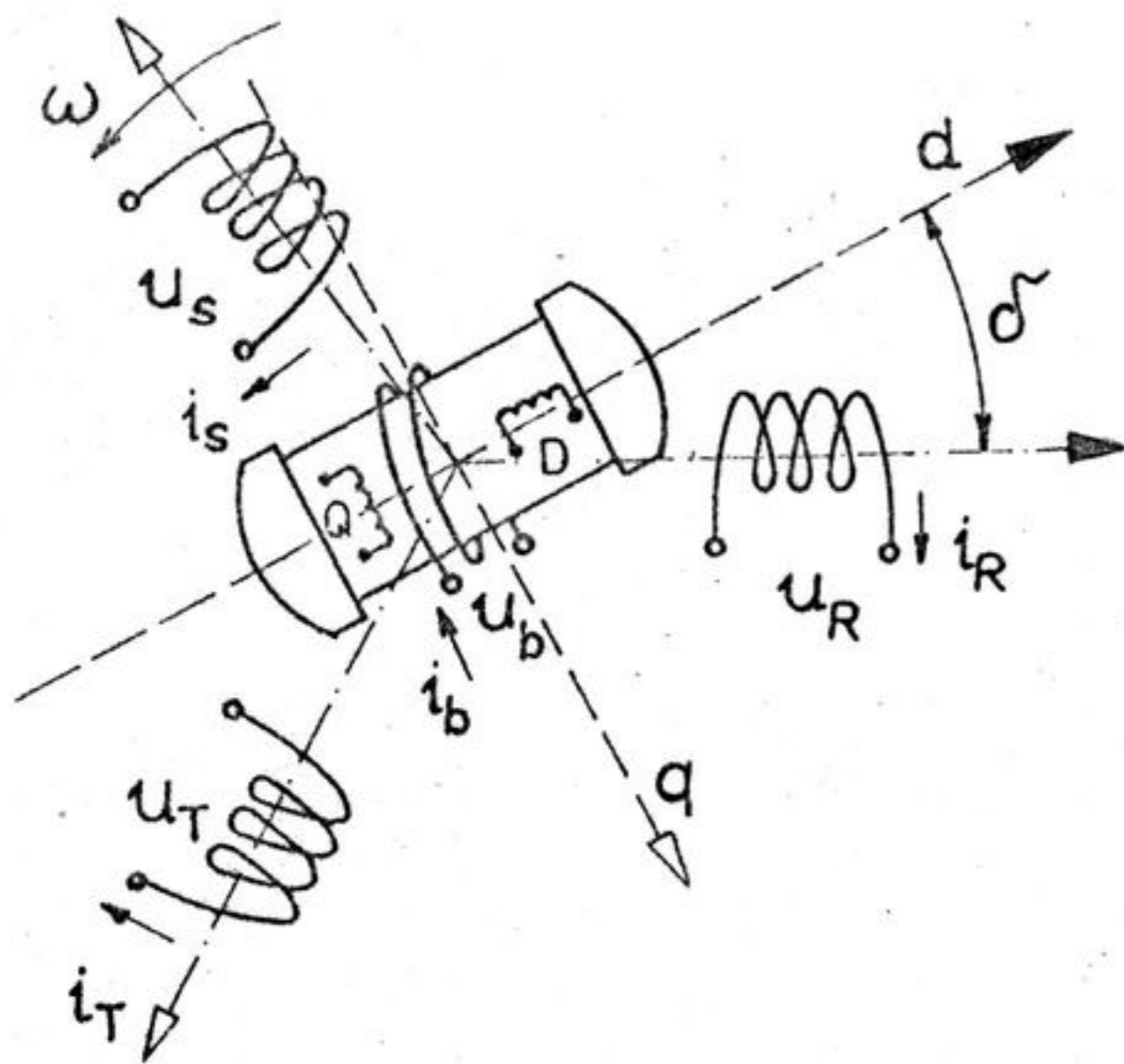
Vývoj v konstrukci a provozu alternátorů velkých výkonů vede k maximálnímu využití vinutí i magnetických obvodů; dnešní stroje mají zkratový poměr 0,5 až 0,4 i menší. Snížení rezervy stability paralelního provozu alternátorů s malým zkratovým poměrem je v dnešní době vyváženo moderními budicími soustavami s dostatečnou výkonovou rezervou a rychlými regulátory napětí, které umožňují provoz alternátorů i za mezí statické stability (oblast malé stability) s dostatečnou rezervou.

Synchronní alternátor

Základní rovnice synchronního stroje v ustáleném chodu

V této kapitole jsou popsány matematické vztahy vyjadřující chování alternátoru v ustáleném stavu při typických provozních stavech. Na obr. 2.6 je znázorněn synchronní stroj s trojfázovým statorovým vinutím (R, S, T) a budicím vinutím v rotoru.

Matematické řešení vychází z popisu elektromagnetických jevů, v jednotlivých vinutích. Statorová vinutí a budicí vinutí si představujeme jako cívky, jejichž elektrické vlastnosti odpovídají skutečným vinutím. Tlumič nahrazujeme vzhledem k jeho nesymetrii dvěma náhradními vinutími.



Obr. 2.6. Schéma synchronního stroje

Matematický model synchronního stroje vychází z těchto zjednodušujících předpokladů :

- a/ Sinusové rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře
- b/ Zanedbáváme vliv sycení
- c/ Předpokládáme lineární závislost proudů a magnetických toků
- d/ Činné odpory všech tří fází jsou shodné

$$r_R = r_S = r_T = r_{st}$$

Na obr. 2.6 i v dalším textu značí :

D ... náhradní vinutí tlumiče v podélné ose \underline{d}

Q ... náhradní vinutí tlumiče v příčné ose \underline{q}

δ ... okamžitý úhel mezi osou rotoru a osou fáze R.

ω ... úhlová rychlost rotoru

u_R, u_S, u_T ... okamžité hodnoty napětí jednotlivých fází statoru

i_R, i_S, i_T ... okamžité hodnoty proudu v jednotlivých fázích statoru

u_b ... napětí budící

i_b ... budící proud

r_b ... činný odpor budícího vinutí

Pro statorová vinutí platí :

$$u_k = - r_{st} i_k - \frac{d\psi_k}{dt} \quad (k = R, S, T) \quad (2.4)$$

kde ψ_k je magnetický tok
spřažený s příslušnou fází

Pro vinutí rotoru

$$u_b = r_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad \text{kde } \psi_b \text{ magnetický tok spřažený s budícím vinutím} \quad (2.5)$$

Při definici výrazů pro spřažený magnetický tok použijeme periodicky proměnné vzájemné indukčnosti. Lineární transformace do os d, q bude mít transformační úhel rovný úhlu δ . Transformací odstraníme proměnné vzájemné indukčnosti. Úhel δ i úhlová rychlost ω se uvádí v přepočtu pro dvoupólový stroj. Fyzikální podstatou použití lineární transformace je rozklad magnetomotorických napětí do dvou os, přičemž poloha os odpovídá osám rotorových vinutí.

Transformační rovnice se budou tedy aplikovat pouze pro statorová vinutí :

$$x_d = \frac{2}{3} [x_R \cos \delta + x_S \cos (\delta - 120^\circ) + x_T \cos (\delta + 120^\circ)]$$

kde x_d je poměrná hodnota reaktance v podélné ose d .

$$x_q = -\frac{2}{3} [x_R \sin \delta + x_S \sin (\delta - 120^\circ) + x_T \sin (\delta + 120^\circ)]$$

kde x_q je poměrná reaktance v příčné ose q

$$x_0 = \frac{1}{3} [x_R + x_S + x_T]$$

kde x_0 je poměrná reaktance pro nulovou složku proudu

Transformační rovnice pro statorová napětí :

$$\begin{aligned} u_d &= -r i_d + \omega \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \\ u_q &= -r i_q - \omega \psi_d - \frac{d\psi_q}{dt} \\ u_0 &= -r i_0 - \frac{d\psi_0}{dt} \end{aligned}$$

kde : u_d je napětí fáze statoru transformované do podélné osy d

u_q je napětí fáze statoru transformované do osy příčné q

i_d je proud statoru transformovaný do podélné osy d

i_q je proud statoru transformovaný do příčné osy q .

(2.6)

ψ_d ... spřažený magnetický tok transformovaný do podélné osy d

ψ_q ... spřažený magnetický tok transformovaný do příčné osy q

u_o ... nulová složka napětí

i_o ... nulová složka proudu

ψ_o ... spřažený magnetický tok pro nulovou složku

Spřažení statorových vinutí s magnetickými toky lze tedy vyjádřit v osových složkách :

$$\begin{aligned}\psi_d &= L_d i_d (+ L_{dD} i_D) - L_{db} i_b \\ \psi_q &= L_q i_q (+ L_{qQ} i_Q)\end{aligned}\tag{2.8}$$

Spřažení magnetického toku s tlumícím vinutím zanedbáváme)

kde : L_d ... indukčnost, která odpovídá synchronní reaktanci X_d
(při měření ustáleného zkratového proudu)

L_q ... indukčnost, která odpovídá reaktanci stroje v příčné ose X_q

L_b ... celková vlastní indukčnost budícího vinutí včetně rozptylu, kterou naměříme když v ostatních vinutích neprotéká žádný proud

L_{dD} .. vzájemná indukčnost mezi vinutím statoru a rotoru pro podélnou osu

L_{qQ} .. vzájemná indukčnost mezi vinutím statoru a rotoru pro příčnou osu

L_{bd} .. vzájemná indukčnost mezi rotorovým a statorovým vinutím

Výrazy v závorkách respektují rychlý přechodný děj, tzv. vinutí tlumiče)

Spřažení magnetického toku s budícím vinutím :

$$\psi_b = - L_{bd} i_d + L_b i_b\tag{2.9}$$

Příkon dodávaný turbínou pro dvoupólový stroj :

$$P_h = m_h \cdot \frac{\omega}{p_p} ; P_h = m_h \cdot \omega\tag{2.10}$$

kde : m_h ... hnací moment turbíny

p_p ... počet pólových dvojic

Do budícího vinutí dodáváme příkon :

$$P_b = u_b i_b\tag{2.11}$$

Souhrnný příkon se obecně rozdělí na složky :

a/ výkon dodávaný do sítě (součtový výkon všech fází) :

$$p = \sum u \cdot i\tag{2.12}$$

b/ výkon urychlující rotující hmoty :

$$p_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{1}{p_p} \cdot \frac{\omega}{p_p} ; p_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega\tag{2.13}$$

kde : J ... moment setrvačnosti

c/ výkon ztracený v mědi všech vinutí $-\Delta p_{cu}$

d/ výkon potřebný pro vzrůst magnetické energie $- p_{mg}$

Pro celkovou bilanci příkonů pak platí :

$$P_h + P_b = p + p_a + \Delta p_{cu} + p_{mg} \quad (2.14)$$

Pro úhlovou rychlost rotoru platí :

$$\omega = \frac{d\sigma}{dt}$$

Moment synchronního stroje pro $2p_p$

$$m = \frac{3}{2} p_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (2.15)$$

Momentová rovnice rotoru alternátoru :

$$J \cdot \frac{1}{p_p} \frac{d\omega}{dt} = m_h - m \quad (2.16)$$

kde m ... je poměrná hodnota momentu alternátoru

Skluz je roven :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{2\pi f_n - \omega}{2\pi f_n} = 1 - \omega_{p.j.} \quad (2.17)$$

kde : n_s ... synchronní otáčky
 f_n ... jmenovitá frekvence

$$\frac{d\omega_{p.j.}}{dt_{p.j.}} = \frac{ds}{dt_{p.j.}}$$

Označení p.j. představuje poměrné jednotky; tp.j - poměrný čas

Zátěžný úhel ψ je měřen v elektrických radiánech od osy výsledného magnetického pole ke ru osy vnitřního napětí stroje.

Při přechodném jevu se tento úhel mění podle rovnice

$$\psi = -\sigma + \psi_0 - 2\pi f_u t - \tilde{\sigma}_0 \quad (2.18)$$

$\tilde{\sigma}_0$ a ψ_0 jsou počáteční hodnoty v čase $t=0$

Tato rovnice se v poměrném čase zjednoduší na tvar :

$$\psi = \sigma + \psi_0 - t_{p.j.} - \tilde{\sigma}_0 \quad (2.19)$$

$$\frac{d\psi}{dt_{p.j.}} = \frac{d\sigma}{dt_{p.j.}} - 1 = -s$$

Úplná soustava rovnic synchronního stroje

Všechny hodnoty jsou vyjádřeny v poměrných jednotkách, proto jejich výrazné označení p.j. je vypuštěno

$$u_d = -i_d r_{st} - \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_d (1 - s) \quad (2.20)$$

$$\left. \begin{aligned} u_q &= -i_q r_{st} - \frac{d\psi_q}{dt} - \gamma_d (1-s) \\ u_o &= -i_o r_{st} - \frac{d\psi_o}{dt} \end{aligned} \right\} (2.20)$$

de r_{st} je činný odpor jedné fáze

$$u_b = i_b + T_b \frac{d\psi_b}{dt} \quad (2.21)$$

$$0 = i_D + T_d \frac{d\psi_D}{dt}$$

$$0 = i_q + T_q \frac{d\psi_q}{dt}$$

de : T_b je časová konstanta budícího vinutí
 T_d .. časová konstanta tlumiče v podélné ose
 T_q .. časová konstanta v příčné ose

Pro spřažené magnetické toky transformované do os d a q

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= i_d X_d + i_D - i_b \\ \psi_q &= i_q X_q + i_Q \\ \psi_o &= i_o X_o \end{aligned} \right\} (2.22)$$

Pohybová rovnice synchronního alternátoru :

$$T_m \cdot \frac{dS}{dt} = \gamma_q i_d - \gamma_d i_q - m_h \quad (2.23)$$

de : T_m .. je mechanická časová konstanta stroje

$$\frac{d\delta}{dt} = 1 - S \quad (2.24)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -S \quad (2.25)$$

Pohybovou rovnicí lze upravit dosazením vztahu (2.24) a (2.25)

$$T_m \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m \frac{d^2\psi}{dt^2} = m_h - \gamma_q i_d + \gamma_d i_q \quad (2.26)$$

$$T_m = \frac{J \cdot (2\pi f_n)^3}{p_p^2 3 U_n I_n} \quad [\text{rad}; \text{kgm}^2; \text{Hz}; \text{V}; \text{A}]$$

Mechanickou časovou konstantu můžeme vyjádřit v sekundách

$$T_m = \frac{J \cdot (2\pi f_n)^2}{p_p^2 3 U_n I_n} \quad [\text{sec}; \text{kgm}^2; \text{Hz}; \text{V}; \text{A}] \quad (2.27)$$

nebo

$$T_m = 2,74 \frac{GD^2}{3U_n I_n} \left(\frac{n_s}{1000} \right)^2 \quad [\text{sec}; \text{kgm}^2; \text{V}; \text{A}, \text{ot}/\text{min}] \quad (2.28)$$

Tato konstanta je dána dobou, za kterou by stroj dosáhl v klidu synchronních otáček, kdyby během celého rozběhu byl stálý zrychlující moment odpovídající výkonu, rovnému jmenovitému zdánlivému výkonu.

Ustálené stavy synchronního stroje pracujícího na tvrdou síť při synchronních otáčkách

$$\begin{aligned} u_R &= u_s \cos(\omega_s t + \varphi_u) \\ u_S &= u_s \cos(\omega_s t + \varphi_u - 120^\circ) \\ u_T &= u_s \cos(\omega_s t + \varphi_u + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.29)$$

u_s ... napětí sítě (v poměrných jednotkách)

φ_u .. počáteční úhel fázoru napětí

$$\omega_s = 2\pi f_n$$

t .. reálný čas v sekundách

a/ Chod naprázdno

Alternátor je spojen se sítí, ale nedodává proud.

Pro $t = 0$ odpovídá počáteční úhel δ_0

$$\delta = \delta_0 + \omega_s t$$

Po transformaci soustavy do roviny p,q :

$$\begin{aligned} u_d &= u_s \cos(\delta_0 - \varphi_u) \\ u_q &= -u_s \sin(\delta_0 - \varphi_u) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Hodnoty δ_0 a φ_u nejsou voleny libovolně ale jsou dány vztahy odpovídající^{mi} chodu alternátoru naprázdno :

$$i_d = i_q = 0, \text{ z toho plyne } \psi_q = 0$$

Protože $\omega = \omega_s$ je zároveň $i_D = i_Q = 0$

Dosazením do (2.20) dostaneme :

$$u_d = -\frac{d\psi_d}{dt}$$

$$u_q = -\psi_d$$

Protože u_d a u_q jsou hodnoty konstantní, pak uvedeným rovnicím vyhovuje podmínka :

$$u_d = 0$$

$$u_q > 0$$

Za chodu naprázdno je vztah mezi δ_0 a φ_u :

$$\delta_0 - \varphi_u = \frac{3\pi}{2} \quad (2.31)$$

Takže při chodu naprázdno :

$$u_d = 0$$

$$u_q = u_s$$

✓ Alternátor dodává činný a jalový výkon do sítě

Při zvětšení hnacího momentu turbíny se rotor alternátoru urychlí a v rovnovážném stavu, kdy je hnací moment turbíny roven elektrickému momentu alternátoru se poloha rotoru ustálí v poloze, kdy je v předstihu před synchronně se otáčejícím polem statoru o úhel ϑ , který nazýváme zátěžným úhlem.

$$\vartheta_0 - \varphi_u = \frac{3\pi}{2} + \vartheta \quad (2.32)$$

Zvolíme-li $\varphi_u = -\frac{3\pi}{2}$ je počáteční úhel rotoru ϑ_0 roven zátěžnému ϑ . Jestliže je svorkové napětí jednotlivých fází :

$$\begin{aligned} u_R &= -u_s \sin \omega_s t \\ u_S &= -u_s \sin (\omega_s t - 120^\circ) \\ u_T &= -u_s \sin (\omega_s t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.33)$$

pak je třeba dosadit za počáteční úhel rotoru s osou fáze R statoru úhel :

$$\vartheta_0 = \vartheta$$

Dále za těchto podmínek platí :

$$\begin{aligned} u_d &= u_{st} \sin \vartheta \\ u_q &= u_{st} \cos \vartheta \end{aligned} \quad (2.34)$$

Podle vztahů (2.20) a (2.22) lze kreslit fázorový diagram synchronního alternátoru. Hodnoty i_d ; i_q ; u_d ; u_q nejsou časové fázory, proto diagram reprezentuje jenom jejich velikosti a vzájemnou polohu

$$\begin{aligned} u_d &= -i_d r_{st} + i_q x_q \\ u_q &= -i_q r_{st} + e_v - i_d x_d \end{aligned} \quad (2.35)$$

dostaneme moment synchronního alternátoru v ustáleném stavu :

$$m = \left[\frac{u_{st} i_b}{x_d} \sin \vartheta + \frac{1}{2} u_{st}^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\vartheta \right] \quad (2.40)$$

Závislost momentu m na zátěžném úhlu alternátoru ϑ je na obr. 2.8., který je nakreslen pro tyto parametry :

$$\begin{aligned} x_d &= 1,25, \\ x_q &= 0,80 \\ u_s &= 1,0 \quad \text{budící proud } i_b \text{ je proměnný} \end{aligned}$$

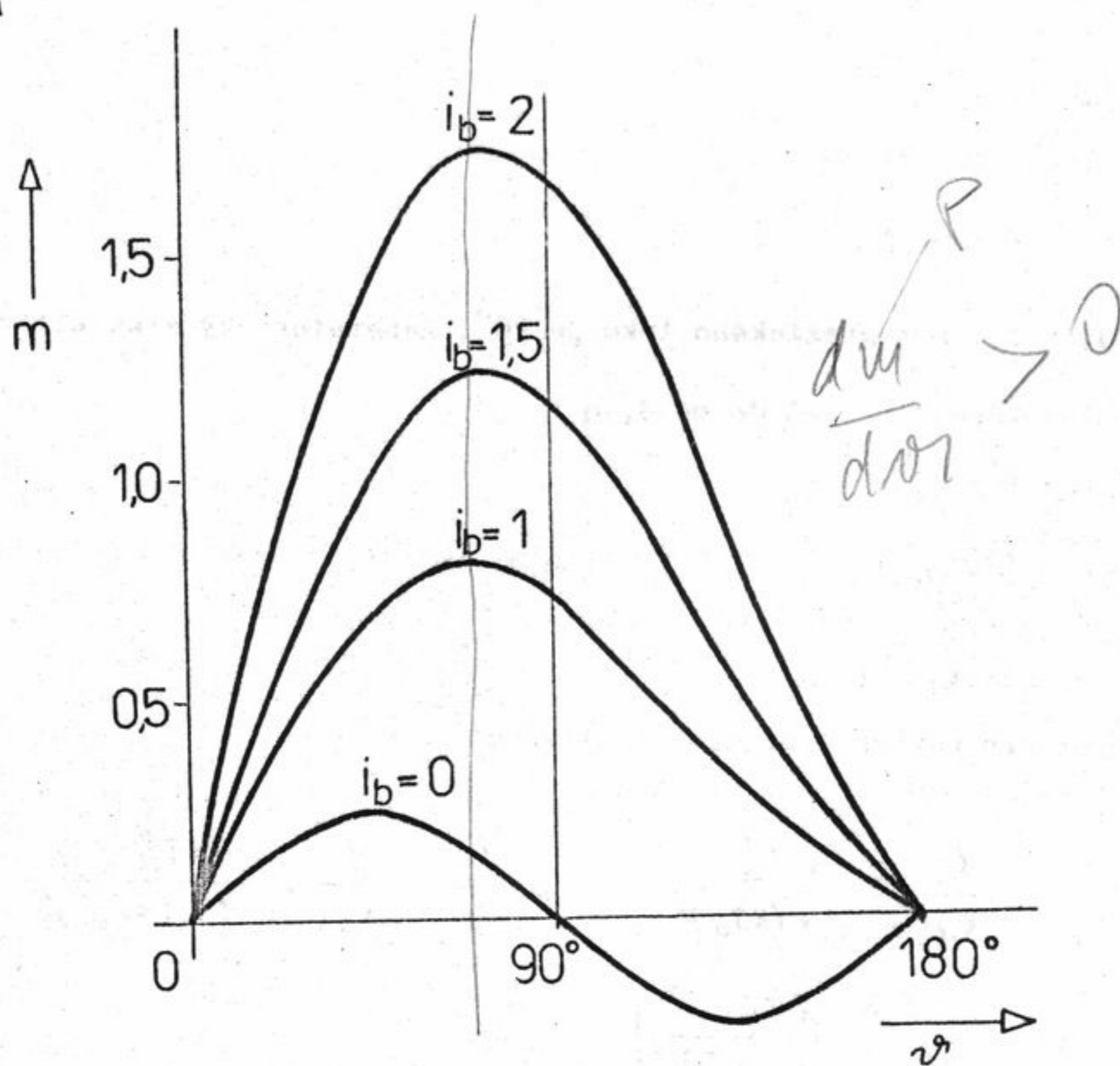
Podmínka stabilního chodu synchronního stroje :

$$\frac{dm}{d\vartheta} > 0$$

mez statické stability lze nalézt pro extrém funkce

$$m = f(\vartheta) \text{ kdy } \frac{dm}{d\vartheta} = 0$$

Statická momentová charakteristika na obr. 2.8. a vztah (2.42) je typický pro synchronní stroje s vyjádřenými póly, které mají výrazně rozdílné hodnoty x_d a x_q jako jsou u hydroalternátorů



Obr. 2.8. Statické momentové charakteristiky alternátoru

Ustálený chod synchronního stroje při konstantním skluzu - (asynchronní chod alternátoru ustálený)

Pro vyjádření vztahů budeme používat poměrné jednotky, čas bude reálný.

Pro statorová napětí platí :

$$\begin{aligned} u_R &= u_{st} \cos \omega_s t \\ u_S &= u_{st} \cos (\omega_s t - 120^\circ) \\ u_T &= u_{st} \cos (\omega_s t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.41)$$

Úhel mezi osou rotoru a osou fáze R se bude měnit podle rovnice :

$$\delta = \delta_0 + (1 - s) \omega_s t \quad (2.42)$$

Provedeme transformaci napětí do os d, q :

$$\begin{aligned} u_d &= u_{st} \cos (s \omega_s t - \delta_0) \\ u_q &= u_{st} \sin (s \omega_s t - \delta_0) \end{aligned} \quad (2.43)$$

Při dalším rozboru zanedbáme stejnosměrnou složku, která se rychle tlumí a zaniká, dále zanedbáme činný odpor statorového vinutí. Pro toky spřažené s vinutími jednotlivých fází alternátoru platí rovnice :

$$\begin{aligned} \psi_R &= -u_{st} \sin \omega_s t \\ \psi_S &= -u_{st} \sin (\omega_s t - 120^\circ) \\ \psi_T &= -u_{st} \sin (\omega_s t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.44)$$

Vzájemný posuv fázoru napětí a magnetického toku je 90° , generatorický stav alternátoru.

Provedeme transformaci spřažených toků do os d, q :

$$\begin{aligned} \psi_d &= -u_{st} \sin (s \omega_s t - \delta_0) \\ \psi_q &= u_{st} \cos (s \omega_s t - \delta_0) \end{aligned} \quad (2.45)$$

Na základě vyjádření proudů i_d ; i_q a i_R

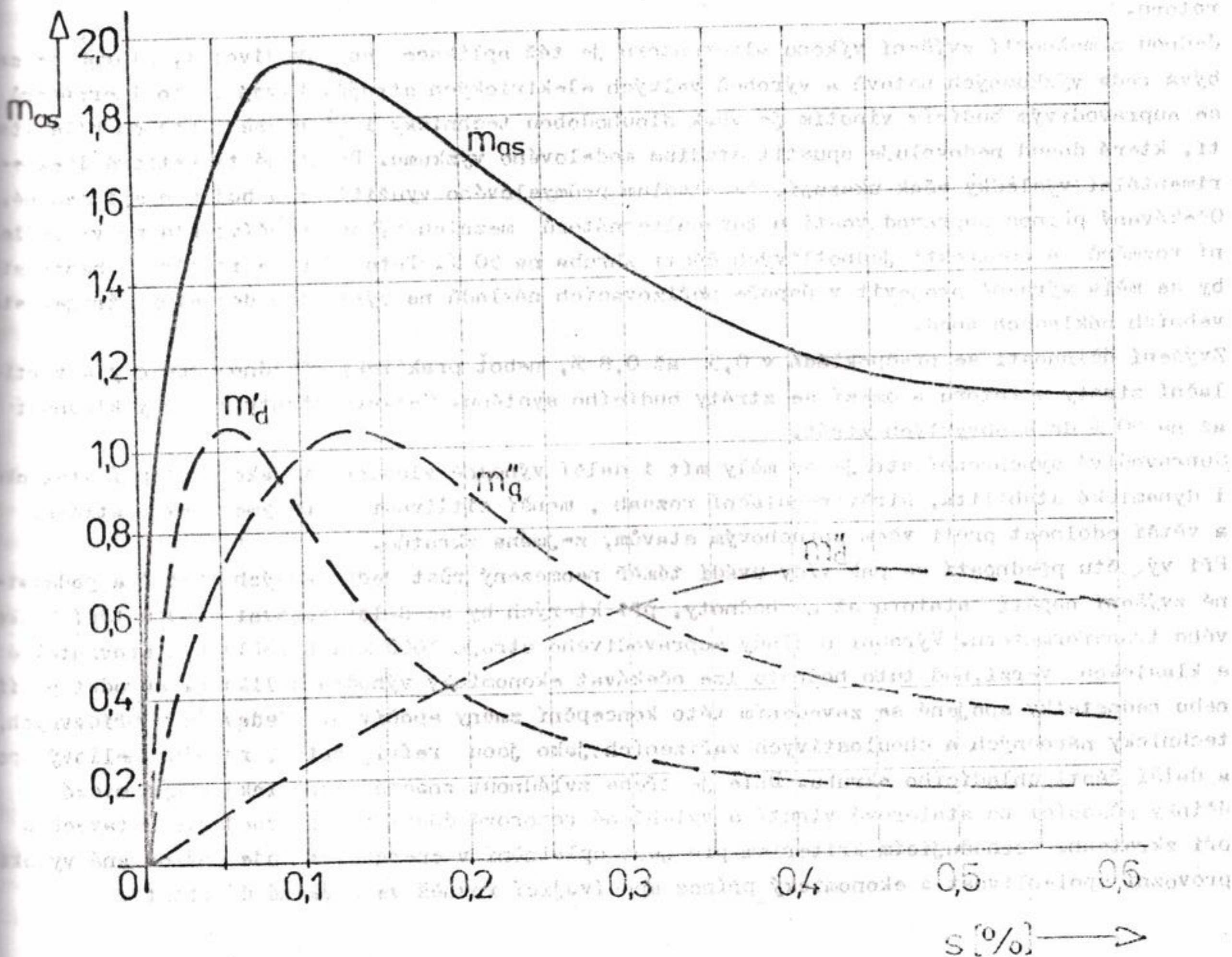
dostaneme konečný výraz pro asynchronní moment alternátoru :

$$\begin{aligned} m_{as} &= \frac{u_{st}^2}{2} \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \frac{s T'_d}{1 + (s T'_d)^2} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{s T''_d}{1 + (s T''_d)^2} + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) \cdot \frac{s T''_q}{1 + (s T''_q)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.46)$$

Tento vztah můžeme vyjádřit jako součet tří dílčích momentů

$$m_{as} = m'_d + m''_d + m''_q$$

- m_d ... složka momentu, která je dána změnou společného magnetického toku budícího vinutí a tlumícího obvodu v podélné ose
- m'_d ... složka momentu, která je dána změnou rozptylových magnetických toků budícího vinutí a tlumícího obvodu v podélné ose
- m''_q ... složka momentu, která je dána proudy v tlumícím obvodu rotoru v příčné ose
- x_d ... reaktance alternátoru v podélné ose (synchronní reaktance)
- x_q ... reaktance alternátoru v příčné ose (v příčné ose je jen jeden obvod - obvod tlumiče)



Obr. 2.9. Složky asynchronního momentu alternátoru

- x'_d ... přechodná reaktance v podélné ose
- x''_d ... rázová reaktance
- x''_q ... rázová příčná reaktance
- T'_d ... přechodná časová konstanta
- T''_d ... rázová časová konstanta ; T''_q ... rázové příčné časové konstanta

Supravodivé turboalternátory

Trend růstu jednotkových výkonů klasických turboalternátorů se v poslední době poněkud zmírnil a u současných dvoupólových strojů dosahuje výkonu 1300 MW, u čtyřpólových strojů 1600 MW s účinností kolem 98,5 %. Těchto příznivých výsledků se podařilo docílit vyšším využíváním aktivních materiálů a zejména pokroky v řešení chlazení statorového i rotorového vinutí. Hlavním problémem dalšího růstu mezních jednotkových výkonů je dynamické namáhání rotoru i statoru a s ohledem na značné rozměry a hmotnost jednotlivých částí stroje, zde přistupují výrobní a dopravní potíže. Při zachování dosavadního trendu vývoje je další zvyšování parametrů obtížné, neboť průměr rotoru a jeho délka je omezena, značný růst ztrát je na překážku zlepšování účinnosti. Maximální dosažitelný výkon se dnes odhaduje u dvoupólových strojů asi na 2000 MVA, u čtyřpólových strojů na 3000 MVA. Intenzivně se hledají a zkoumají i jiné cesty a prostředky ke zvýšení parametrů alternátorů, jako například vodní chlazení rotoru, podchlazení vodičů, bezdrážkové vinutí statoru i rotoru.

Jednou z možností zvýšení výkonu alternátoru je též aplikace supravodivosti, kterou se zabývá řada výzkumných ústavů a výrobců velkých elektrických strojů. Vývoj turboalternátorů se supravodivým budícím vinutím je však dlouhodobou technicky i finančně náročnou záležitostí, která dosud nedovoluje opustit stádium modelového výzkumu. Dosažené teoretické i experimentální výsledky však ukazují, že stádium průmyslového využití je v budoucnosti reálné. Očekávaný přínos supravodivosti u turboalternátorů mezních výkonů spočívá hlavně ve snížení rozměrů a hmotnosti jednotlivých částí zhruba na 50 %. Tato redukce rozměrů a hmotnosti by se měla výrazně projevit v úspoře pořizovacích nákladů na výrobní a dopravní stroje, stavebních nákladech apod.

Zvýšení účinnosti se předpokládá v 0,5 až 0,8 %, neboť prakticky odpadnou Joulovy a ventilační ztráty v rotoru a omezí se ztráty budícího systému. Celkové ztráty by měly klesnout až na 50 % dnes obvyklých ztrát.

Supravodivé synchronní stroje by měly mít i další výhodné vlastnosti jako je lepší statická i dynamická stabilita, širší regulační rozsah, menší citlivost na nesymetrické zatížení a větší odolnost proti všem poruchovým stavům, zejména zkratům.

Při výřtu předností se pak vždy uvádí téměř neomezený růst jednotkových výkonů a podstatné zvýšení napětí statoru až na hodnoty, při kterých by se dalo uvažovat o vypuštění blokového transformátoru. Výrobní náklady supravodivého stroje 1000 MVA by měly být srovnatelné s klasickou verzí, nad tuto hodnotu lze očekávat ekonomicky výhodné aplikace. Původní potíže nebo nedostatky spojené se zavedením této koncepční změny spočívají především v přídatných, technicky náročných a choulostivých zařízeních, jako jsou refrigerátor, rotační heliový spouš, a další části chladicího okruhu. Dále je třeba zvládnout značné mechanické a dynamické účinky působící na statorové vinutí a vylehčené rotorové části při přechodových stavech a při zkratech. Rozhodujícím kritériem pro jeho uplatnění v energetice bude požadovaná vysoká provozní spolehlivost a ekonomický přínos spočívající rovněž ve zvýšené účinnosti.

Koncepce supravodivého turboalternátoru

Při návrhu supravodivých synchronních strojů je nutno respektovat určitá omezení, která mají vliv na zásadní koncepci stroje. Současně realizované supravodiče nejsou použitelné pro střídavé proudy průmyslové frekvence a lze je tedy využít pouze pro budící vinutí. Při řešení základní otázky, kde umístíme kotvu do statoru nebo do rotoru je rozhodující skutečnost, že velké proudy a navíc značná napětí na rotujících sběracích kroužcích nelze reálně zvládnout. V úvahu tedy připadá řešení klasické koncepce s budícím supravodivým vinutím v rotujícím kryostatu uvnitř rotoru. Z hlediska využití budícího magnetického toku je nejvýhodnější dvoupólový stroj.

Vyšší hodnoty magnetické indukce omezí použití feromagnetických materiálů prakticky jen na vnější stínění. Feromagnetické materiály stejně nelze v oblasti nízkých teplot používat, neboť při hlubokém podchlazení křehnou a ztrácejí mechanickou pevnost. Navíc v nich vznikají přídavné a hysteretní ztráty, které by zatěžovaly chladič. Supravodivé budící vinutí je nutno uzavřít do poměrně mohutného elektromagnetického stínicího štítu, který chrání budící vinutí před vnikáním střídavých magnetických polí a indukcí střídavých proudů při přechodných, poruchových nebo nesymetrických provozních stavech. Supravodivé vinutí by mělo být schopno absorbovat určité zbytkové množství energie (asi 100 kJ/m^3), aniž by došlo k přechodu supravodivého stavu do normálního stavu. Ze všech materiálů má v oblasti velmi nízkých teplot daleko nejvyšší měrné teplo kapalně helium. Tyto aspekty určují výběr jak vhodného supravodivého vodiče tak i vinutí.

Z hlediska provozních vlastností supravodivého alternátoru posuzujeme očekávané hodnoty reaktancí jako výhodné z hlediska regulace, statické stability a chování stroje při zkratech. Velikost synchronní reaktance lze ovlivnit geometrickým uspořádáním vodičů a volbou proudových hustot rotorového i statorového vinutí. Předpokládané hodnoty reaktancí :

$$\text{Synchronní} \quad X_d = (40 \div 60)\%$$

$$\text{přechodná} \quad X'_d = (25 \div 40)\%$$

(tranzitní)

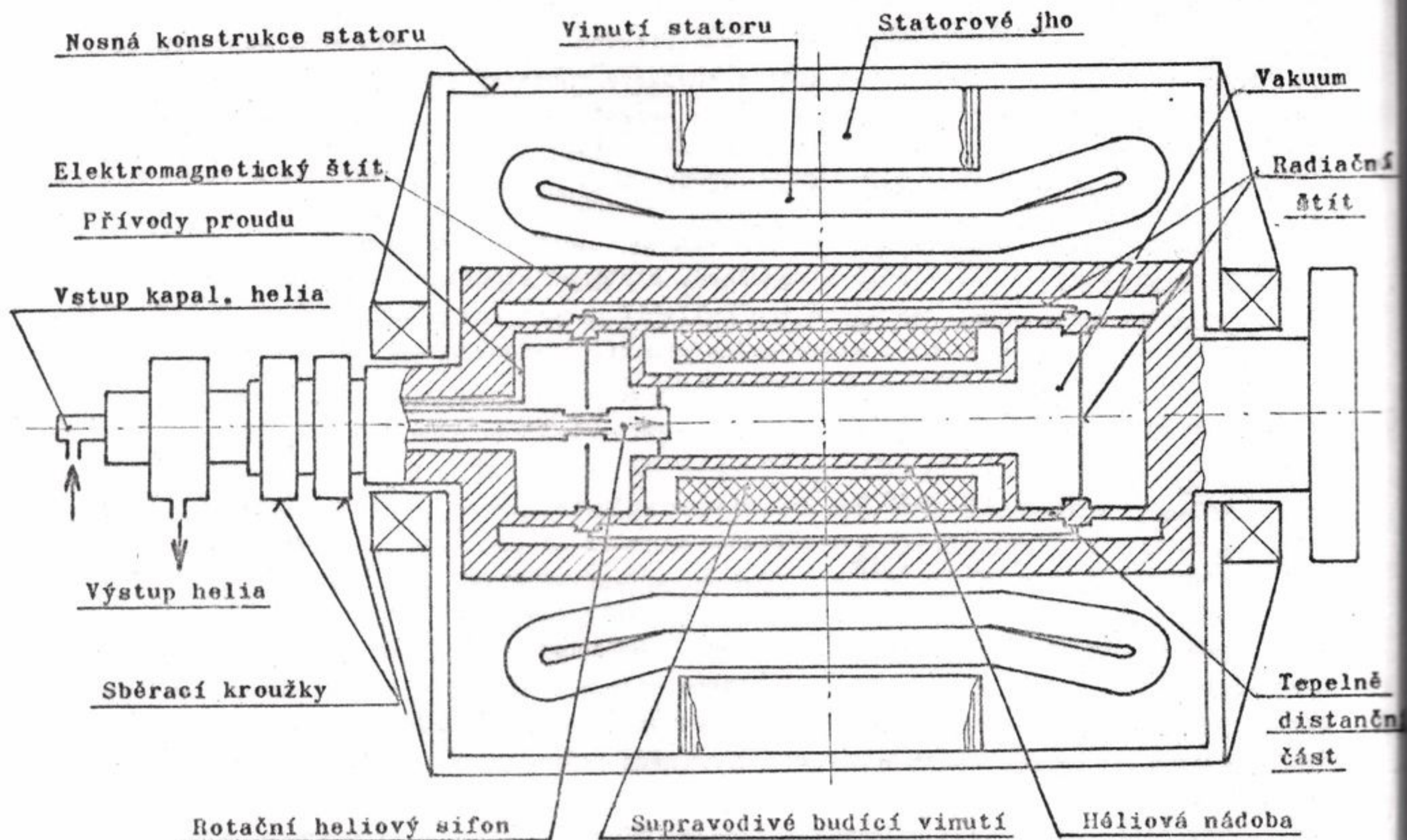
$$\text{rázová} \quad X''_d = (15 \div 25)\%$$

(subtranzitní)

Z důvodů dynamické stability stroje, to znamená jeho chování při přechodných a poruchových stavech, je žádoucí, aby přechodná reaktance stroje byla co nejmenší. Při spolupráci stroje s velkou propojenou elektrizační soustavou, jejíž náhradní impedance je malá, může být pak přechodná reaktance vyšší než v případě připojení stroje na dlouhé přenosové vedení. Dynamickou stabilitu stroje lze charakterizovat tzv. kritickou dobou vypnutí neboli časem, po který zůstává alternátor při trojfázovém zkratu v synchronním chodu. Tato doba by měla být asi 200 ms, neboť reálný čas na vypnutí zkratu lze uvažovat asi 100ms. Moment setrvačnosti supravodivého stroje včetně turbíny bude asi o 25% menší než u klasické varianty. Tento parametr bude muset být vyvážen elektrickými parametry alternátoru, aby se zachovaly příznivé podmínky pro paralelní spolupráci stroje s elektrizační soustavou.

Charakteristika a provedení stroje

Supravodivé budící vinutí se liší tvarem a způsobem zachycení elektromagnetických a odstředivých sil. Výrobně jednodušší cívky oválného tvaru, které lze také snáze mechanicky upevnit, mají však zhoršené podmínky chlazení. Náročnější způsob provedení sedlového typu vinutí se jeví jako perspektivní s ohledem na jeho lepší vlastnosti při rozložení magnetického pole a poměrů při chlazení. Je třeba vidět, že tvar magnetického pole není dán železem, ale geometrickým uspořádáním vinutí. Supravodivé budící vinutí chlazené tekutým heliem musí být co nejlépe tepelně izolováno od okolního prostředí. Dále musí toto vinutí přenášet plný moment stroje a musí být tedy spojeno dostatečně tuhou konstrukcí s tělesem rotoru. Těmto požadavkům vyhovuje například tenkostěnná trubka z austenitické oceli nebo jiných nemagnetických materiálů. Supravodivé budící vinutí by mělo být uloženo na co největším relativním poloměru vůči vinutí statoru, aby se magnetický tok dostatečně využil. Celá soustava budicího vinutí musí být schopna zachytit značné silové účinky od vlastního magnetického pole (převažují nad odstředivými silami) a také síly způsobené různou tepelnou roztažností použitých materiálů. Na obr. 2.10 je znázorněn příklad uspořádání synchronního stroje se supravodivým budícím vinutím. Supravodivý vodič je většinou proveden na bázi Nb-Ti.



Obr. 2.10. Synchronní stroj se supravodivým budícím vinutím

Indukčnost supravodivého budícího vinutí bude mnohem vyšší než u klasických strojů, ohmický odpor bude naopak nepatrný. Tyto parametry určují dlouhou budící časovou konstantu, která značně omezí regulační schopnosti. Nárazové přibuzení bude s ohledem na časovou konstantu buzení a vlastnosti kryogenních přívodů budícího proudu neúčinné a nerealizovatelné. Nelze tedy počítat s podstatným vlivem vnější regulace na dynamické chování stroje a proto je nutné navrhnout tlumící vinutí tak, aby chování alternátoru bylo optimální.

Elektromagnetický rotorový štít musí kromě již zmíněné stínící funkce zachytit všechny silové a momentové účinky vznikající při přechodných a poruchových stavech a zároveň by měl tlumit kývání rotoru. Radiační štít umístěný mezi vnějším elektromagnetickým štítem a heliovou vanou se uplatní současně jako sekundární elektrické stínění. K jeho chlazení se využívá odpařeného helia, stejně jako u momentových mostů a přívodů proudu. Také se uvažuje o systémech vnitřního chlazení supravodivých vodičů.

Třífázové statorové vinutí se většinou navrhuje jako bezdrážkové s přímým kapalinovým chlazením. Pro výběr vinutí je rozhodující způsob zachycení sil, výrobní a technologické otázky a v neposlední řadě významná otázka volby jmenovitého napětí stroje, které by mělo být co nejvyšší.

Buzení alternátoru musí odpovídat požadavkům daným provozem alternátoru jak při normálním chodu, tak i při přechodných nebo poruchových stavech v elektrizační soustavě. Zvyšování jednotkových výkonů synchronních strojů klade stále vyšší požadavky na parametry budících soustav a regulátory napětí alternátorů. Vyvedení výkonu do soustav vvn s napětím 400 kV zvyšuje nároky na rychlost regulace napětí s ohledem na statickou a dynamickou stabilitu.

Výkon budící soustavy se pohybuje mezi 0,3 až 0,6 % jmenovitého výkonu alternátoru, jeho velikost je určena podle požadované rezervy napětí a proudu při nárazovém buzení. Například pro turboalternátor 235 MVA je potřebný stejnosměrný výkon budiče s dvojnásobnou rezervou napětí 1100 kW.

základní požadavky na budící soustavy :

a/ Provozní spolehlivost.

Spolehlivost budící soustavy alternátoru musí být dostatečně vysoká, aby při poruše buzení nedošlo k odstavení alternátoru. Budící soustava proto obsahuje rezervní buzení, které umožňuje provoz alternátoru při poruše hlavního budiče. Na provozní spolehlivost budící soustavy má značný vliv spolehlivost sběracího ústrojí. Důležitou otázkou je volba napájecího systému buzení podle závislosti na vnější síti nebo na napětí alternátoru.

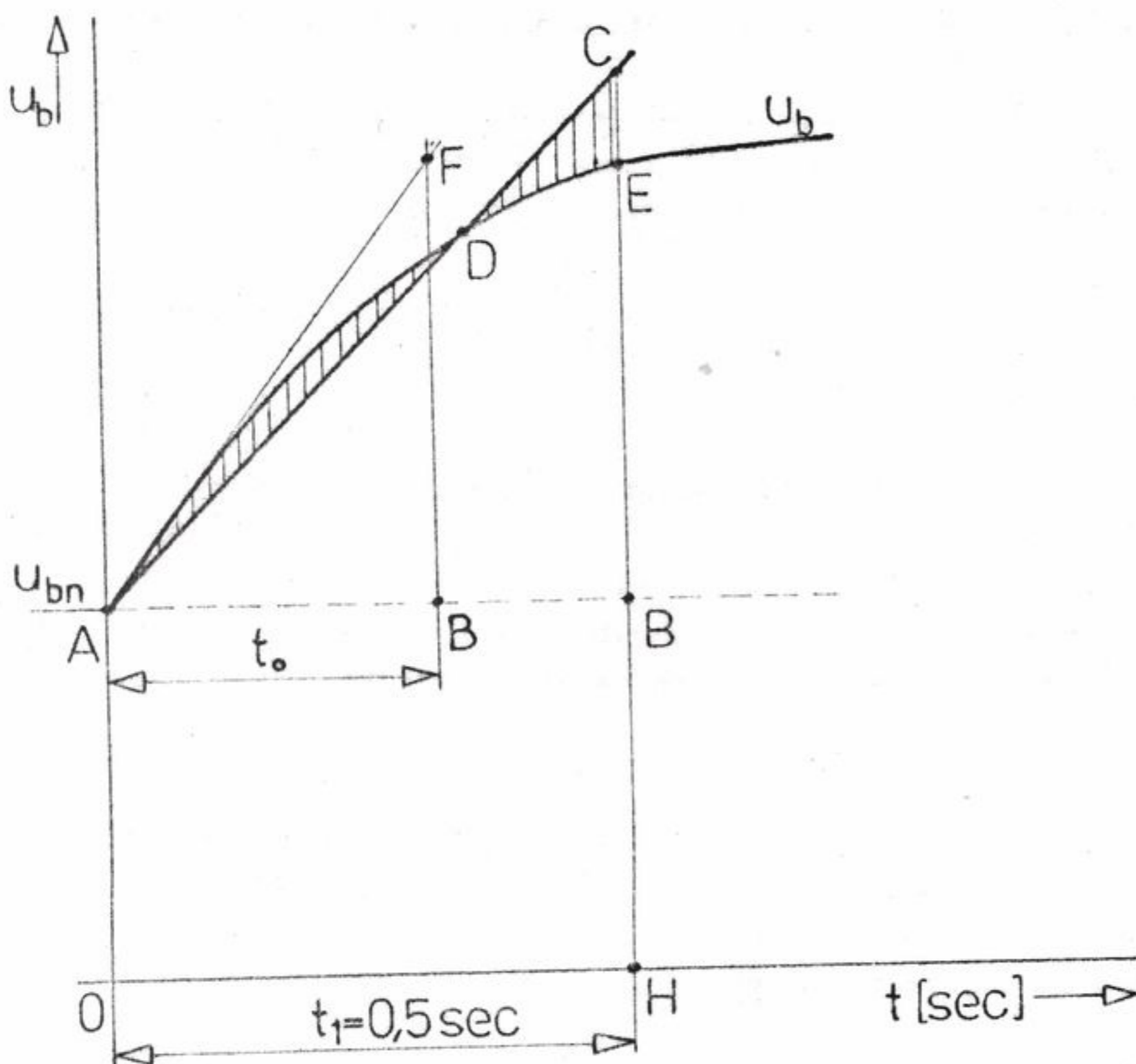
b/ Dostatečný regulační rozsah proudu a napětí

Pro normální provozní stav alternátoru požadujeme možnost plynulé regulace budícího proudu v mezích daných provozním diagramem stroje. Z hlediska přechodných nebo poruchových stavů alternátoru a poruchových stavů v elektrizační soustavě, do které alternátor pracuje, požadujeme rychlé změny hodnot budícího napětí a proudu.

c/ Rychlost změny budícího napětí alternátoru

Všeobecným požadavkem provozu ES je možnost rychlého růstu napětí alternátoru, které je podmíněno rychlým růstem budícího napětí a dále pak rychlou činností regulátoru buzení. Stejně tak jsou kladeny nároky na rychlé odbuzení alternátoru při náhlém odlehčení nebo poruchovém stavu.

Rychlost růstu budícího napětí je charakterizována střední rychlostí této změny ze prvních 0,5 sec. Změna budícího napětí se vyjadřuje v poměrných jednotkách.



Obr. 2.11. Charakteristika $u_b = f(t)$

kde značí : $\overline{BF} = \Delta u_{b0}$

$\overline{BC} = \Delta u_b$

$\overline{BH} = u_{bn}$

Střední rychlost růstu budícího napětí (pro : $u_{bn} = 1$
 $t_1 = 0,5 \text{ sec}$) :

$$v_b = \frac{\frac{\Delta u_b}{u_{bn}}}{t_1} = \frac{\Delta u_b}{0,5} = 2 \Delta u_b \quad [\text{p.j.}] \quad (2.47)$$

Poměrná hodnota budícího napětí :

$$u_b = \frac{U_b}{U_{bn}}$$

kde : U_b ... skutečná hodnota okamžitého budícího napětí [V]

U_{bn} ... jmenovitá hodnota budícího napětí [V]

Počáteční rychlost růstu budicího napětí (pro $u_{bn} = 1$) :

$$v_{bo} = \frac{\frac{\Delta u_{bo}}{u_{bn}}}{t_0} = \frac{\Delta u_{bo}}{t_0} \quad [\text{sec}^{-1}] \quad (2.48)$$

kde : t_0 ... čas, kdy uvažujeme nárůst Δu_{bo} [sec]

Budiče se dělí podle rychlosti odezvy při chodu budiče napřízno na :

- rychlé budiče $v_{bo} > 2$
- středně rychlé budiče $2 > v_{bo} > 0,5$
- pomalé budiče $v_{bo} < 0,5$

Druhy a provedení budících soustav

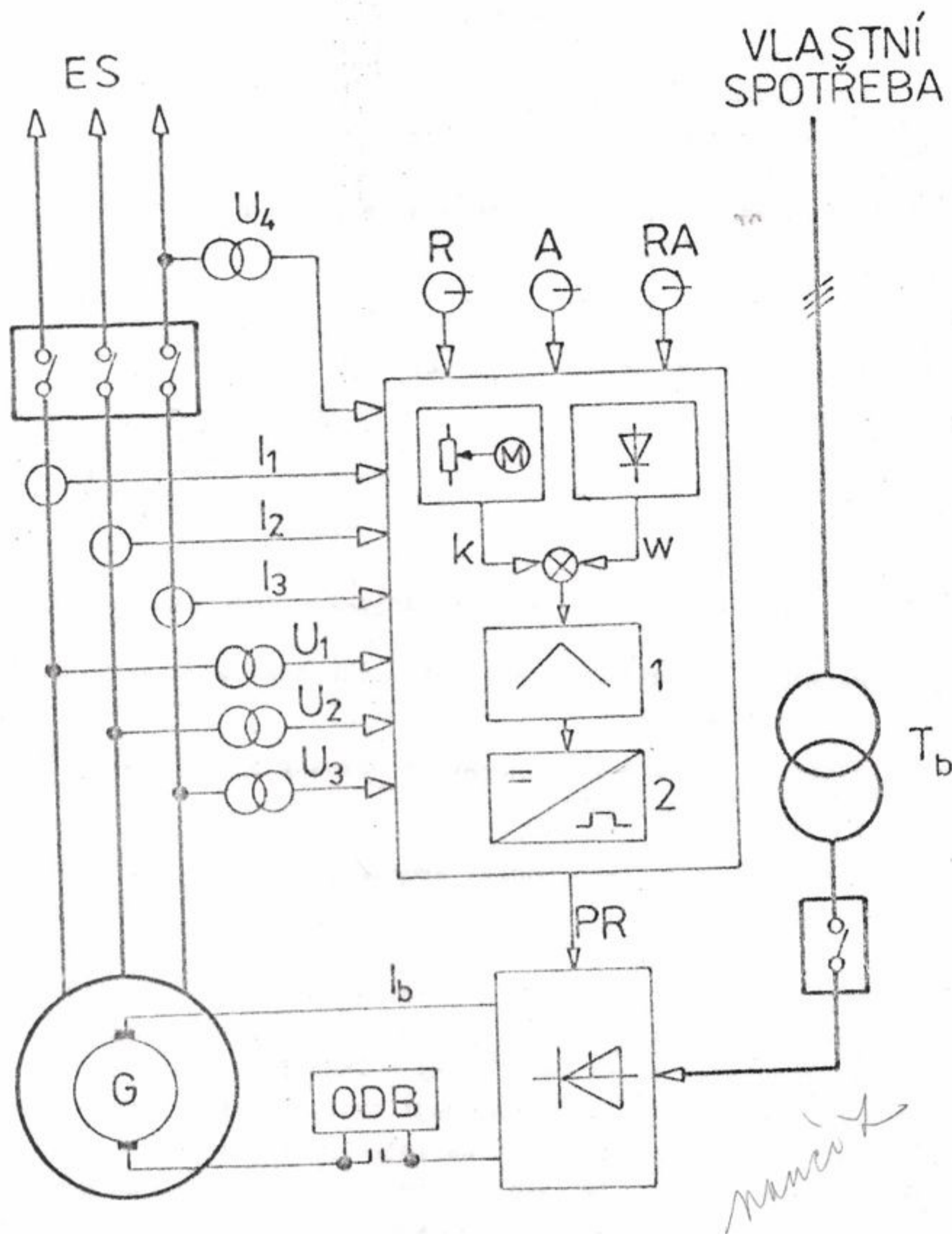
Podle způsobu zajištění napájení elektrickou energií dělíme budící soustavy na :

- a/ závislé. Zdrojem elektrické energie je vnější síť nebo rozvod vlastní spotřeby elektrárny, případně samostatný agregát.
- b/ nezávislé. Zdrojem elektrické energie pro buzení je pomocný alternátor nebo stejnosměrný budič umístěný na hřídeli hlavního alternátoru.

Podle způsobu provedení rozdělujeme závislé budící soustavy na tyto zásadní typy :

Přímo řízené buzení

Napájení budící soustavy je provedeno z rozvodu vlastní spotřeby přes transformátor T_b jak je uvedeno na obr. 2.12. Usměrnění střídavého proudu a řízení jeho hodnoty se provádí v usměrňovači s tyristory. Regulátor napětí používaný v ČSSR řídí velikost budicího proudu tvarováním řídicích impulsů pro tyristory. Obecně mají tyto soustavy vynikající provozní vlastnosti zejména při přechodných jevech, neboť ke změně budicího napětí a proudu dochází prakticky okamžitě. Tato soustava umožňuje také pracovat se záporným budícím napětím, a to při rychlých změnách jalového zatížení alternátoru nebo při jeho náhlém odlehčení. V budícím obvodu je vřazen odbuzovač.



Obr. 2. 12. Závislá budicí soustava s přímým řízením buzení

Nepřímo řízené nezávislé buzení

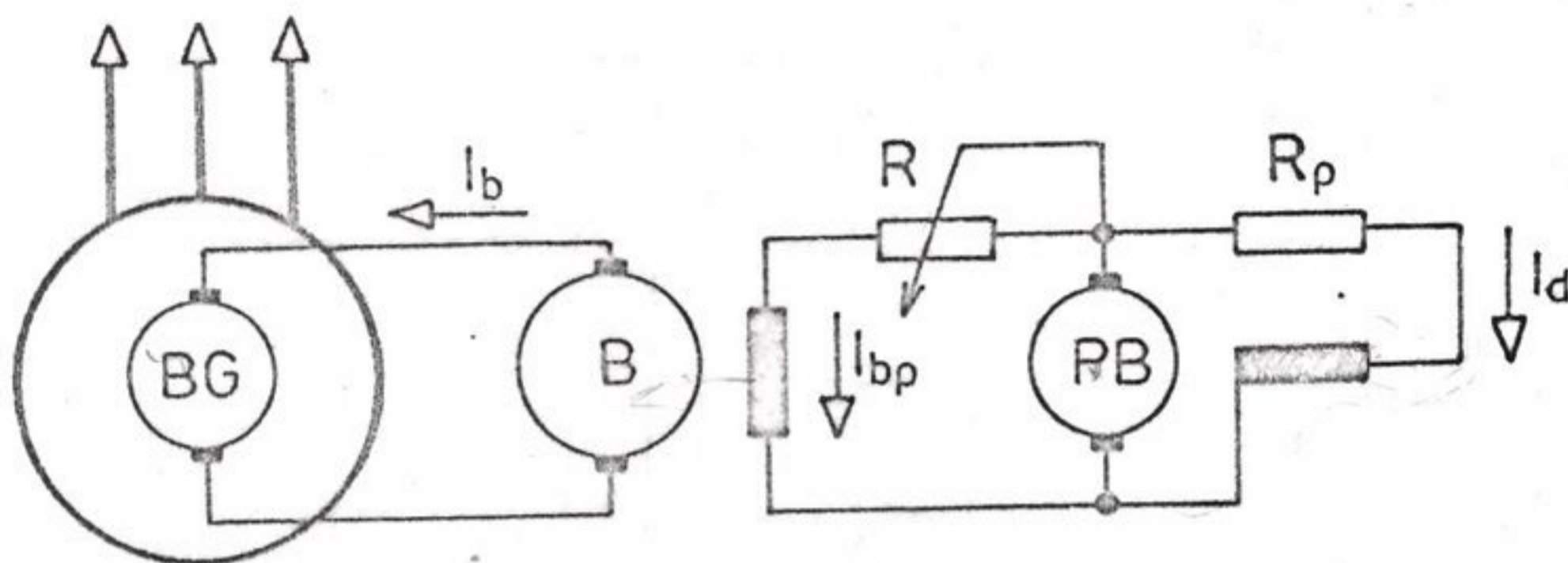
V hlavním budícím obvodu se provádí usměrnění střídavého proudu z pomocného alternátoru neřízenými diodami. Regulace buzení se uskutečňuje prostřednictvím řízeného usměrňovače v buzení pomocného alternátoru. Budicí soustava obsahuje rezervní buzení napájené regulačním transformátorem IR. Situace je naznačena na obr. 2.13. Tento systém buzení a regulace napětí je použit u některých strojů 235 MVA.

Při porovnání rychlosti změny budicího proudu u tohoto systému proti přímo řízené soustavě se navíc uplatní časové konstanty budicího obvodu pomocného alternátoru.

Nezávislé budicí soustavy se stejnosměrným budičem na hřídeli

U turboalternátorů menších výkonů nebo u hydroalternátorů, které mají nižší otáčky, se používá stejnosměrný budič s komutátorem. Přenos budicího proudu do rotoru alternátoru se provádí pomocí sběracího ústrojí.

V mnoha případech se používá pomocného budiče, umístěného na hřídeli alternátoru pro buzení budiče. Regulace napětí se provádí prostřednictvím odporu R v obvodu vinutí magnetů hlavního budiče, jak je znázorněno na obr. 2.14.



Obr. 2.14. Budicí soustava s pomocným budičem

kde značí : BG ... buzení hlavního alternátoru
 B ... hlavní budič
 PB ... pomocný budič
 R_p ... odpor pro řízení napětí pomocného budiče

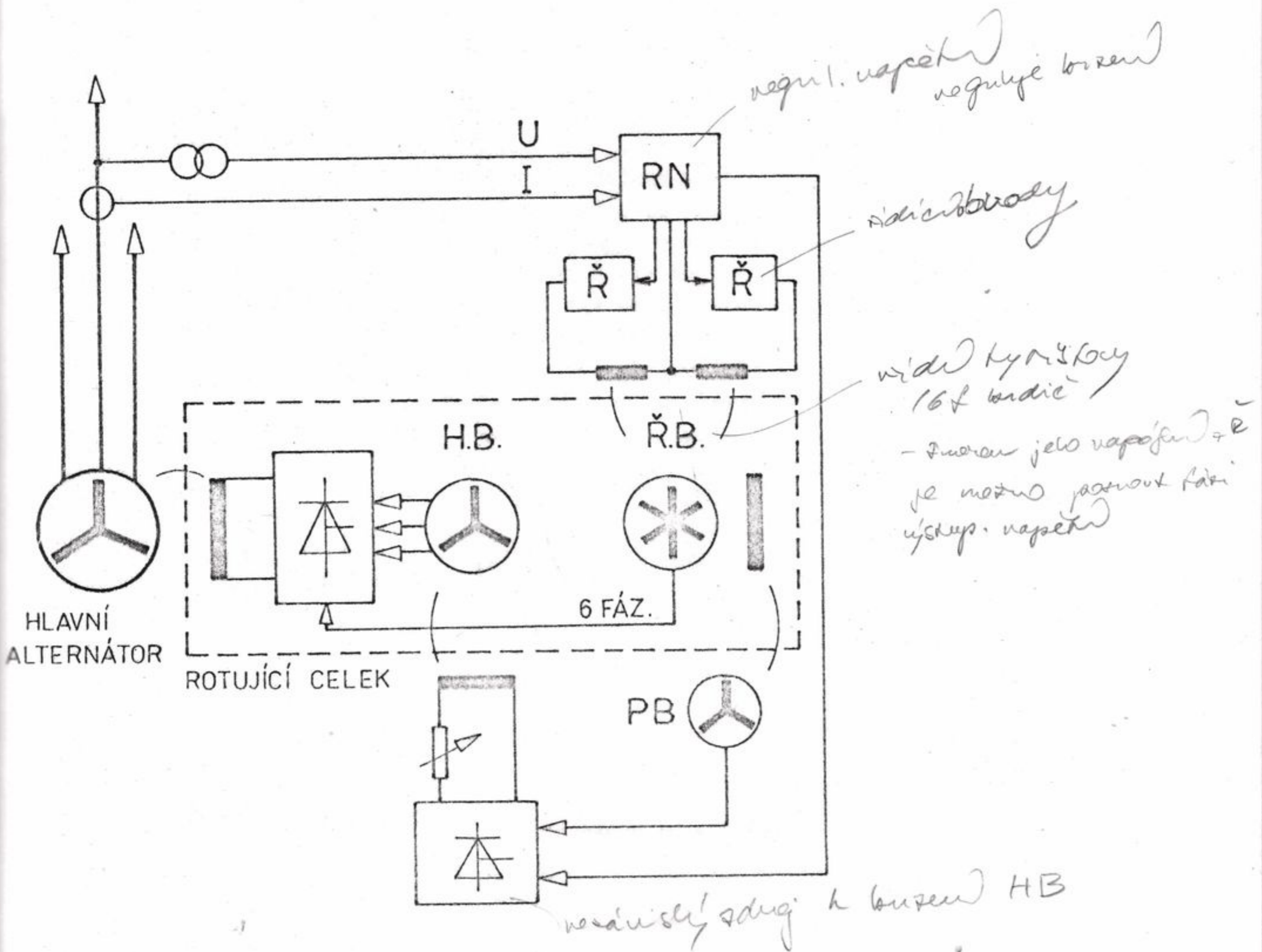
Při posouzení parametrů budicích soustav se stejnosměrným budičem na hřídeli je třeba uvažovat vliv otáček budiče. U rychloběžných strojů je rychlost růstu napětí budiče větší než u strojů pomaloběžných. Časová konstanta budiče T_b je nepřímo úměrná rychlosti růstu napětí.

Při velmi malých otáčkách hlavního soustrojí se proto někdy volí jako budič oddělené dynamo poháněné asynchronním motorem napájeným z rozvodu vlastní spotřeby.

Bezkrůžkové budicí soustavy

Jsou určeny pro alternátory velkých výkonů, neboť zde odpadá sběrací ústrojí, které může být při velkých budicích proudech zdrojem poruch. Tyto soustavy můžeme rozdělit do dvou skupin:

- budicí soustava s rotujícími výkonovými diodami. Tento systém je vhodný např. pro špičkové elektrárny s leteckými proudovými motory nebo pro elektrárny s vysokým stupněm automatizace provozu,
- budicí soustava s rotujícími tyristory. Tento systém je určen pro alternátory velkých výkonů, a proto musí být dostatečně spolehlivý.



Obr. 2.15. Bezkrůžková budící soustava

Budící soustava na obr. 2.15. je napájena ze střídavého alternátoru, který je na hřídeli hlavního stroje. Střídavý proud je veden do dutiny rotoru, kde se usměrňuje pomocí řízených ventilů. Řízení tyristorů je provedeno přes řídicí šestifázový budič Ř.B. s budícím vinutím v podélné i příčné ose. Změnou jeho napájení z řídicích obvodů Ř je možné posunout fázi výstupního napětí až o 180° vzhledem k hlavnímu budiči. Pomocný budič P.B. slouží jako nezávislý zdroj pro buzení hlavního budiče H.B. Regulace buzení je řízena regulátorem napětí RN. U tohoto uspořádání je velmi náročné konstrukční i technologické řešení s ohledem na velké odstředivé síly působící na všechny části umístěné v rotujícím tělese. Poruchy jednotlivých tyristorů je třeba signalizovat, což se provádí například fotoelektrickou metodou.

Odbuzování alternátoru

Odbuzení alternátoru je nutné provést při všech vážných poruchách, které nastanou na alternátoru, nebo bloku alternátor-transformátor. Odbuzení provádíme pomocí odbuzovače, který je samostatnou a důležitou součástí budícího obvodu. Jeho úkolem je přeměna elektromagnetické energie nahromaděné v budícím obvodu alternátoru v tepelnou energii. Tím odbuzovač zajistí, aby se tato energie nevybíjela do místa zkratu

a omezuje tak rozsah poškození. Další jeho funkcí je oddělení budícího vinutí od napájecího zdroje a případné odbuzení budiče.

Postup odbuzení se obecně provede tak, že do budícího vinutí zařadíme odpor takové hodnoty, aby proces odbuzení probíhal co nejrychleji, ale aby při tom povolené napětí nepřekročilo povolenou mez danou bezpečností izolace budícího vinutí alternátoru.

Kdyby se rotor alternátor spojil nakrátko, byla by doba odbuzení dlouhá, protože vlastní odpor budícího vinutí je malý. Kdyby se naopak budící obvod rozpojil, vzniklo by na něm vysoké napětí, které by mohlo poškodit izolaci budícího vinutí. Přepětí vzniklá v budícím obvodu alternátoru v procesu odbuzování musí být menší než 75 % napětí zkušebního.

Z provozního hlediska požadujeme, aby provedení odbuzovače a jeho zapojení bylo co nejjednodušší a provozně spolehlivé.

Odbuzovač se ovládá dálkově impulsem ochrany, působících na odpojení alternátoru od sítě. Nepůsobí při činnosti nadproudové ochrany při přetížení alternátoru, kdy dojde k odpojení od vnější sítě a kdy alternátor napájí svoji vlastní spotřebu.

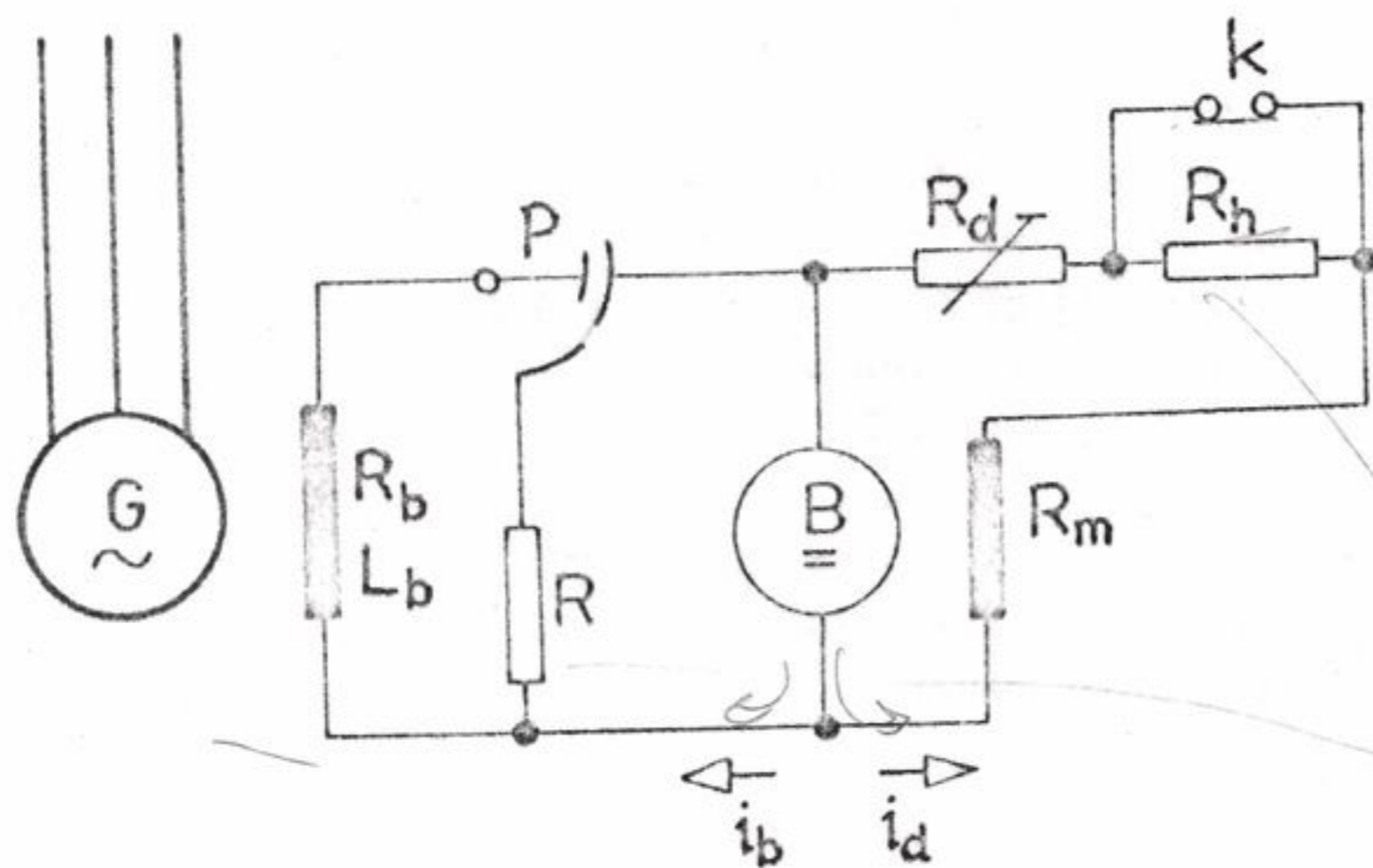
Provedení odbuzovačů a jejich činnost

V praxi byly zavedeny různé typy odbuzovacích systémů, které se liší principem činnosti i výkonem, který odpovídá výkonu budící soustavy alternátoru. Dále budou popsány tři systémy, které se používají nejčastěji:

- a/ odbuzovač s paralelním odporem
- b/ odbuzovač se zhášecí komorou
- c/ odbuzení alternátoru invertorovým chodem budícího systému

Odbuzovač s paralelním odporem

Schema budící soustavy, která má hlavní budič na hřídeli alternátoru je na obr. 2.16.



Obr. 2.16. Odbuzovač s paralelním odporem

- kde značí :
- B ... hlavní budič
 - R_b ... ohmický odpor budícího vinutí alternátoru
 - L_b ... indukčnost budícího vinutí alternátoru

- i_b ... budící proud alternátoru
- i_d ... budící proud budiče
- R_d ... regulační odpor buzení
- R_h ... pomocný odbuzovací odpor
- R ... hlavní odbuzovací odpor ohmický
- R_b ... odpor budícího vinutí budiče
- F ... přepínač odbuzovače

Při odbuzování alternátoru nejprve zapojí přepínač odbuzovače F do obvodu buzení alternátoru hlavní odbuzovací odpor R , aniž dojde k rozpojení hlavního obvodu. Při rozpojení obvodu, kterým protéká stejnosměrný budící proud by došlo ke vzniku přepětí, které by mohlo způsobit přeskok na sběracím ústrojí nebo poškodit průrazem budící vinutí alternátoru. Odbuzení budiče se urychlí tím, že se v jeho derivační větvi rozpojí kontakt k a zapojí se tím do obvodu pomocný odbuzovací odpor R_h , který sníží proud i_d . Při odbuzování se objeví na budícím vinutí alternátoru zvýšené napětí, které určíme za předpokladu $i_b = \text{konst}$:

$$u_b^* = i_b (R_b + R) = u_b \frac{R_b + R}{R_b} \quad (2.49)$$

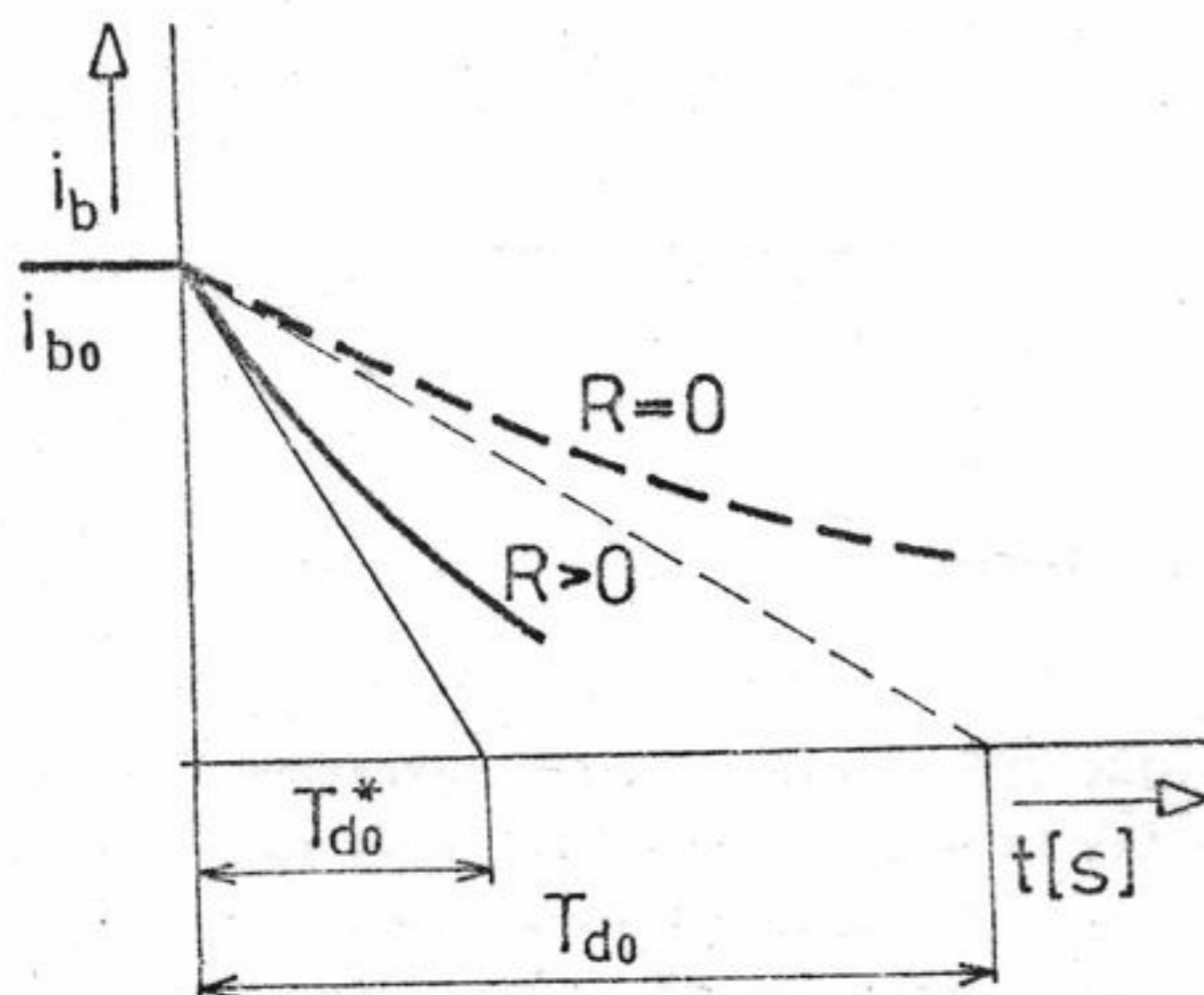
Hlavní odbuzovací odpor se volí tak, aby jeho ohmická hodnota odporu byla asi (2÷3) krát větší než ohmický odpor budícího vinutí alternátoru. Velikost přepětí při odbuzení pak vychází asi (3÷5) krát větší než je jmenovité budící napětí.

Průběh proudu při odbuzení je znázorněn na obr. 2.17.

Budící proud i_b zaniká s časovou konstantou

$$T_{do}^* = T_{do} \cdot \frac{R_b}{R_b + R} \quad (2.50)$$

kde: T_{do} ... časová konstanta budícího vinutí (při rozpojeném statorovém vinutí)



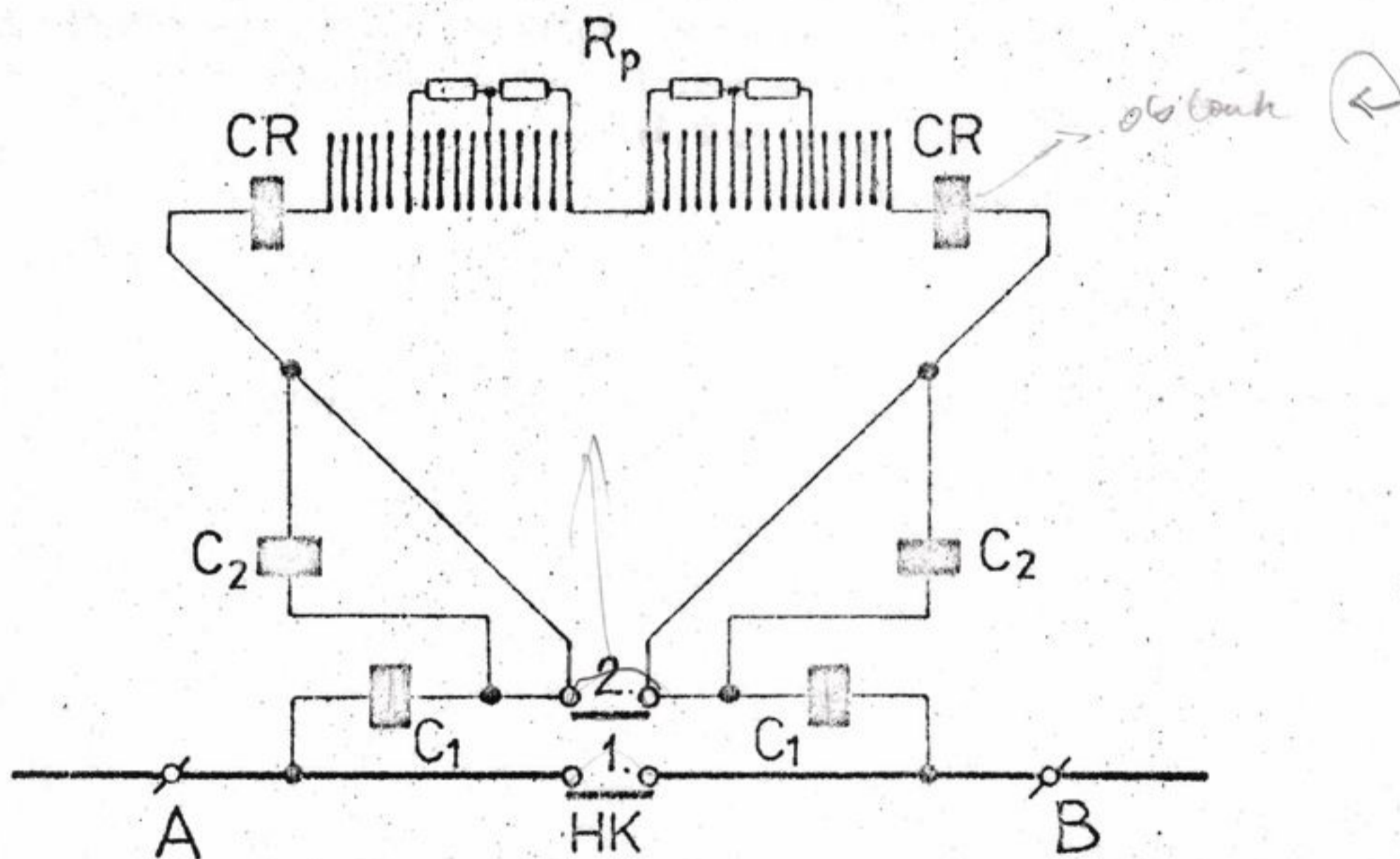
Obr. 2.17. Závislost proudu i_b na čase při odbuzení

Ze vztahu (2.50) je zřejmé, že zmenšení časové konstanty pro odbuzování T_{do}^* oproti časové konstantě T_{do} je v poměru $\frac{R_b}{R_b + R}$, což je obrácená hodnota činitele, určujícího zvýše-

ní napětí při odbuzení. Velikost odporu R tedy výrazně ovlivňuje nejen rychlost doznívání budícího proudu při odbuzení ale i vzrůst napětí na budícím vinutí alternátoru. Návrh velikosti odbuzovacího odporu R musí proto respektovat oba tyto aspekty. Tento typ odbuzovačů se u nás používá u alternátorů jmenovitého výkonu do 100 MW.

b/ Odbuzovač se zhášecí komorou

Pro alternátory s výkonem nad 100 MW se používá odbuzovačů vyšších výkonů s rychlejším útlumem budícího proudu. Výkony budičů se zvyšovaly nejen podle růstu výkonů alternátorů ale i podle požadavků provozu elektrizační soustavy, které si vyžádaly další zvýšení výkonu budiče pro nárazové přibuzení alternátoru. Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo u odbuzovačů, které využívají fyzikálních vlastností krátkého elektrického oblouku konstantní délky. Úbytek napětí na krátkém elektrickém oblouku délky 2-3 mm zůstává konstantní i při velkých změnách proudu. Ideové schéma odbuzovače je nakresleno na obr. 2.18.

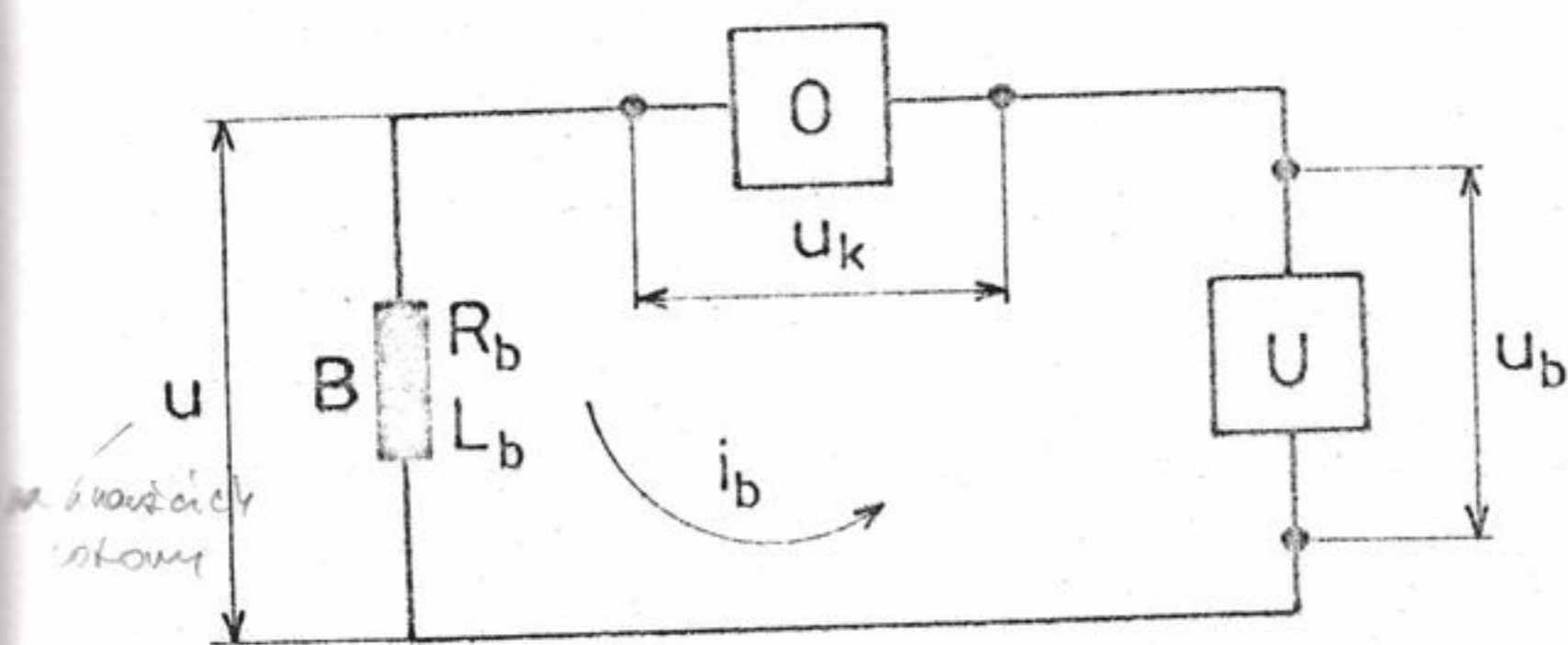


Obr. 2.18. Schéma odbuzovače se zhášecí komorou

V bodech A, B je odbuzovač zapojen do hlavního obvodu buzení alternátoru. Při vypnutí odbuzovače se rozepnou nejprve hlavní kontakty HK - 1. Po rozpojení mezi nimi nevznikne oblouk, protože jsou ještě překlenuty ovodem s pomocnými opalovacími kontakty HK-2. Tímto obvodem, ve kterém jsou vřazeny cívky C_1 a C_2 protéká proud, který po rozpojení zapaluje na kontaktech HK2 elektrický oblouk. Cívky C_1 a C_2 vytváří elektromagnetické pole, které vtahuje oblouk do zhášecí komory. Ta je vytvořena z řady paralelních měděných zhášecích destiček, které jsou navzájem od sebe izolovány.

Elektromagnetická energie nashromážděná v alternátoru se při odbuzovacím procesu mění na tepelnou energii vyzařovanou elektrickým obloukem, která zahřívá destičky zhášecí komory a okolní vzduch. V obvodu destiček jsou umístěny další cívky CR, kterými prochází proud oblouku, což má za následek vznik elektromagnetického pole, které dostává hořící oblouk do rotačního pohybu kolem osy zhášecí komory. Tento pohyb je natolik rychlý, že napomáhá rovnoměrnému rozdělování tepelné energie po povrchu destiček a zabráňuje jejich natavení a přílišnému opalování. Ve zhášecí komoře je oblouk rozdělen na řadu dílčích oblouků, celkové napětí na svorkách zhášecí komory zůstává prakticky konstantní. Paralelně s destičkami zhášecí komory jsou ještě připojeny přidavné odpory R_p , které zabráňují vzniku přepětí při zhasnutí oblouku mezi některými destičkami.

Pro analýzu odbuzovacího procesu budeme předpokládat situaci znázorněnou na obr. 2.19.



Obr. 2.19. Schéma obvodu při odbuzování

Kde značí : O ... odbuzovač se zhášecí komorou
 U ... zdroj budícího napětí
 B ... budící vinutí alternátoru
 u_k ... napětí na odbuzovači

Pro přechodný děj při odbuzování platí :

$$u_b = u_k + R_b \cdot i_b + L_b \frac{di_b}{dt} \quad (2.51)$$

Její řešení :

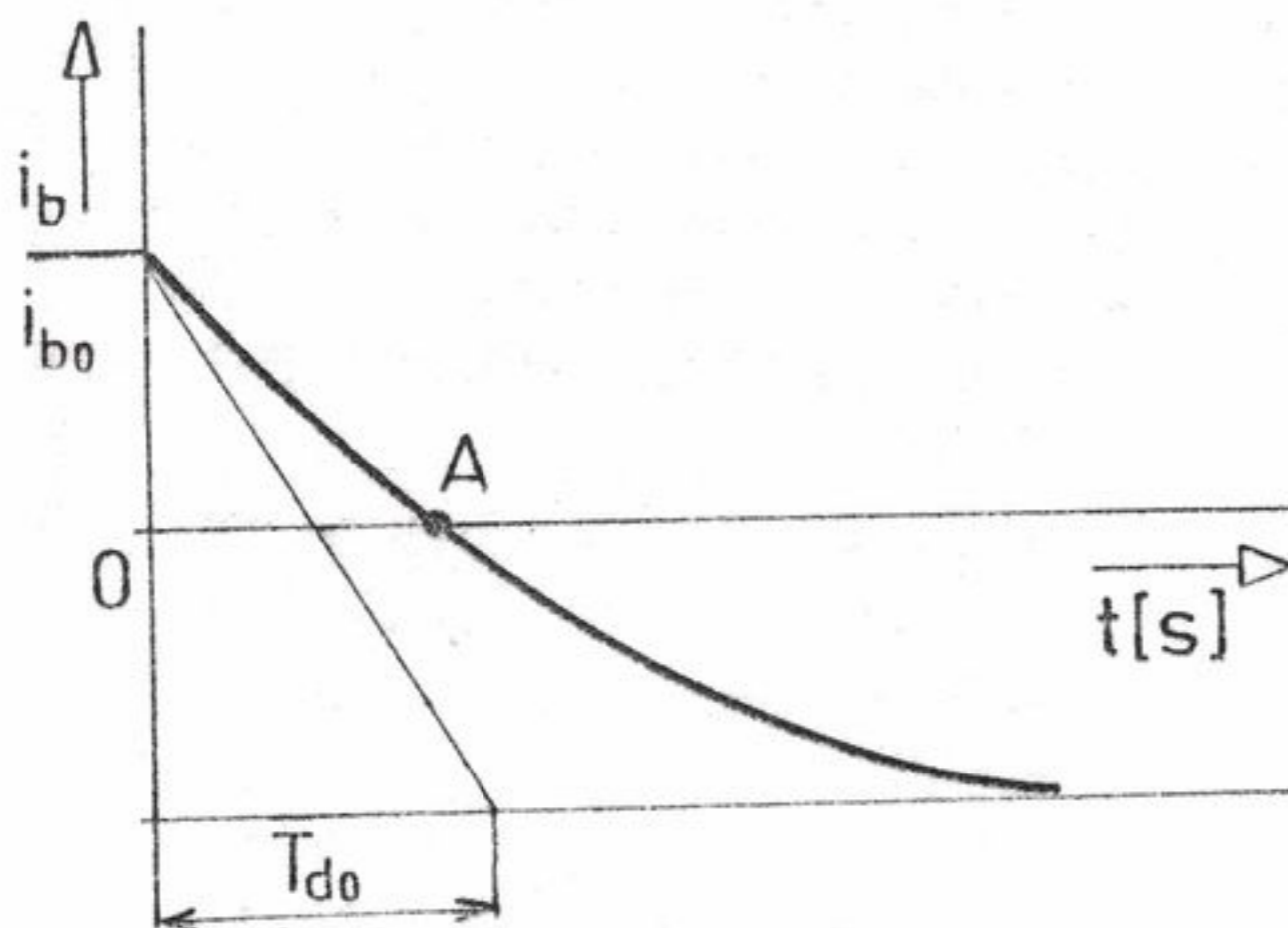
$$i_b = i_{bk} + i_{bo} \cdot e^{-\frac{t}{T_{do}}} \quad (2.52)$$

kde značí : T_{do} ... časová konstanta budícího obvodu
 i_{bo} ... budící proud před odbuzením
 i_{bk} ... proud procházející obvodem při konstantním napětí u_k

Platí:

$$i_{bk} = \frac{u_b}{R_b} = \frac{u_b - u_k}{R_b} \quad (2.53)$$

Grafické vyjádření rovnice (2.52) je na obr. 2 20.



Obr. 2.20. Průběh proudu i_b při odbuzování

Velikost proudu i_{bk} závisí podle vztahu (2.53) na velikosti napětí oblouku u_k , které je vyjádřeno vztahem :

$$u_k = u_d \cdot n \quad (2.54)$$

kde značí : u_d ... napětí mezi jednotlivými destičkami ($u_d = 25-30$ V)
 n ... počet mezer mezi destičkami

Počet destiček ve zhášecí komoře se volí tak, aby maximální napětí na kroužcích rotoru u_{max} bylo menší než je maximální dovolené napětí u_m z hlediska elektrické pevnosti izolace budícího vinutí :

$$| u_{max} | = | u_b - u_{k \max} | \leq u_m \quad (2.55)$$

Pak : $u_{kmax} = u_{max} + u_b$

kde u_{kmax} ... je maximální dovolené napětí na zhášecí komoře odbuzovače.

Maximální dovolené napětí u_m bývá obvykle :

$$u_m = 0,7 u_z \text{ ušeb.}$$

kde : u_z ... zkušební napětí pro budící vinutí

Pak je potřebný počet mezer podle vztahu (2.54) :

$$n = \frac{u_{k \max}}{u_d} = \frac{u_{max} - u_b}{u_d} \quad (2.56)$$

Potřebný počet destiček :

$$n_d = n + 1$$

Protože je zpravidla napětí na zhasací komoře větší než napětí budící ($u_k > u_b$) bude proud i_{bk} podle vztahu (2.53) opačného znaménka než proud i_{bo} . To znamená, že v okamžiku, kdy proud $i_b(t)$ při odbuzování projde nulou (bod A na Obr. 2.20)

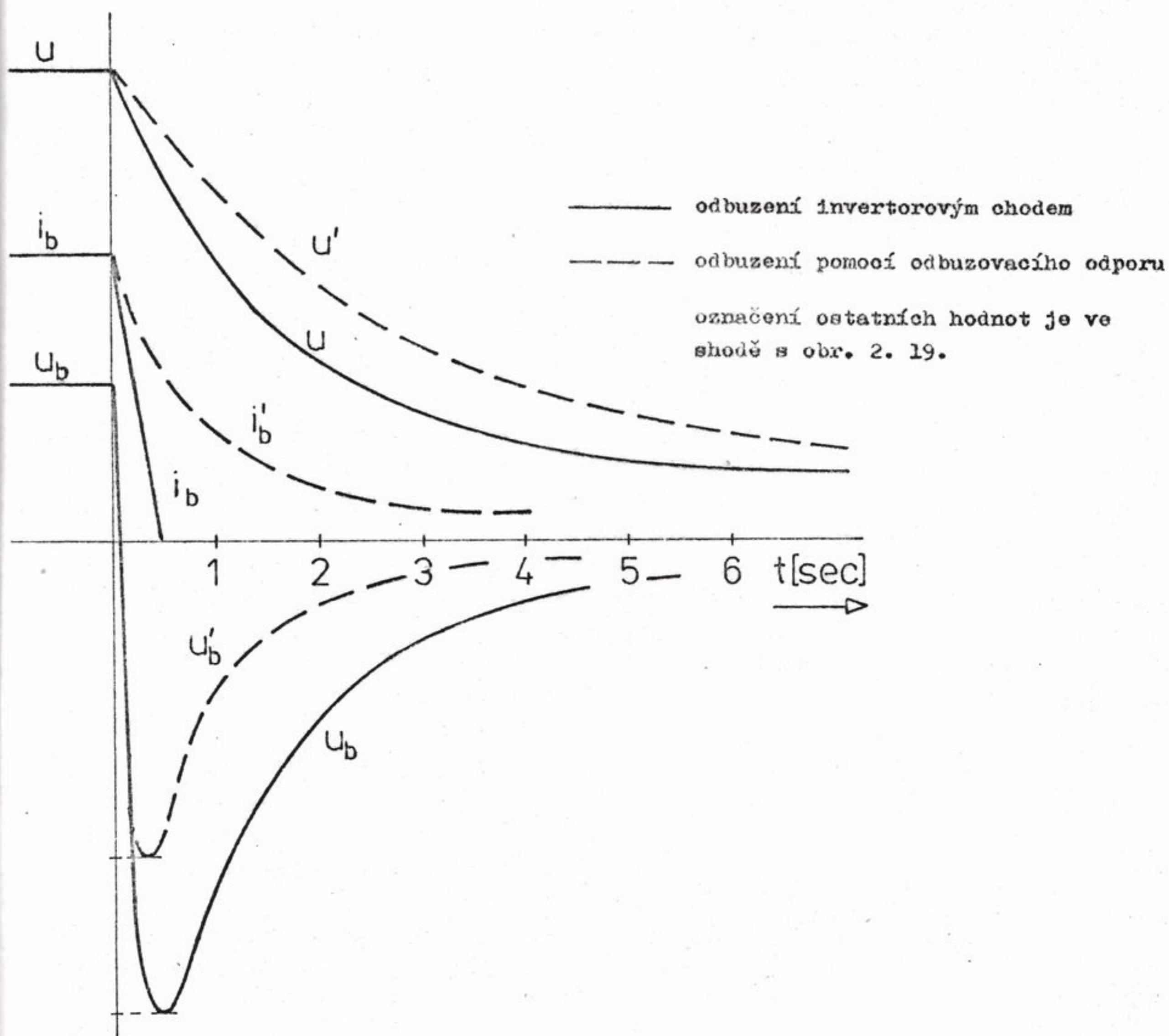
Oblouk ve zhasací komoře zhasne a odbuzování je ukončeno.

Tento typ odbuzovačů řady FG se u nás používá pro turboalternátory a hydroalternátory se jmenovitými výkony nad 100 MW.

c/ Odbuzení alternátoru invertorovým chodem budícího systému

U budících soustav s přímo řízenými usměrňovači, které umožňují rychlou změnu polarity budícího napětí se využívá této vlastnosti k rychlému odbuzení alternátoru. Odbuzování invertorovým chodem řízeného usměrňovače se u nás používá pro odbuzování ^{pří} plánovaném odstavení alternátoru; havarijní odbuzování, které je vyvoláno funkcí ochran nebo zabezpečovacího systému se provádí klasickými odbuzovači popsány v bodech a), b) .

Průběh napětí a proudů při odbuzení invertorovým chodem budícího systému je na obr. 2.21.



Obr. 2.21. Odbuzení turboalternátoru invertorovým chodem budícího systému

2.1.2 Transformátory v elektrárnách

Podle funkce můžeme transformátory v elektrárnách dělit na dvě základní skupiny :

- hlavní transformátory, jejichž úlohou je transformace napětí alternátoru na napětí vvn nebo vn a vyvedení elektrického výkonu do elektrizační soustavy.
Hlavní transformátory mohou být buď blokové (přímo spojené s alternátorem) nebo spojovací (pro spojení dvou napěťových hladin - alternátoru a sítě)
- Transformátory pro vlastní spotřebu zajišťují napájení spotřebičů vlastní spotřeby elektrárny elektrickou energií buď odbočkou z vývodu alternátoru nebo z vnější sítě.

Blokové transformátory

Jsou to hlavní transformátory, které tvoří jednotku s příslušným alternátorem, takže jmenovitý výkon transformátoru odpovídá celkovému zdánlivému výkonu alternátoru. Pro elektrárnské bloky, jejichž vlastní spotřeba je napájena transformátorem na odbočce alternátoru lze volit výkon primárního vinutí blokového transformátoru nižší než je výkon alternátoru v rozmezí 93 až 95 %. Při návrhu výkonu transformátoru a jeho napěťového převodu je třeba respektovat podélný ztrátový výkon a úbytek napětí určený napětím na krátko transformátoru. Příčný ztrátový jalový výkon určuje magnetizační proud transformátoru. Jmenovitá napětí blokových transformátorů se volí tak, aby na jeho výstupní straně (na vvn) bylo napětí na horní povolené hranici provozního napětí. Elektrárna pracuje v elektrizační soustavě také jako zdroj jalového výkonu a proto musí mít i při zatížení poněkud vyšší napětí než soustava do které pracuje. Velikost napětí lze sice regulovat změnou buzení alternátoru, ale regulace napětí v příliš širokých mezích by byla neúčelná a neekonomická. Pro dodatečnou změnu převodu napětí mají blokové transformátory v uzlu vinutí na vyšší straně napětí ještě odbočky, kterými lze upravit převod ve stavu bez zatížení obvykle v rozmezí $\pm 5\%$. Blokový transformátor je obvykle neregulační v provedení trojfázovém nebo je proveden jako tři jednofázové jednotky. Spojení vinutí blokového transformátoru je obvykle provedeno Yd1. Vyvedení výkonu alternátorů velkých výkonů se uskutečňuje do sítě vvn, kde je nulový bod vinutí transformátoru účinně uzeměný.

Spojení vinutí transformátoru na straně alternátoru se provádí většinou do trojúhelníka, aby rozdělení zatížení jednotlivých fází alternátoru bylo více vyvážené. Tímto zapojením se také potlačují vyšší harmonické složky na výstupu transformátoru. Z hlediska pořizovacích nákladů i z provozních hledisek jsou vhodnější trojfázové jednotky. Pro bloky velkých jednotkových výkonů přistupují při volbě základní koncepce transformátoru také otázky dopravních a výrobních možností. Proto jsou vyráběny pro velké výkony alternátoru tři jednofázové jednotky blokového transformátoru.

Také je možné zapojit dva alternátory na jeden transformátor s třemi jednofázovými jednotkami při vyvedení výkonu do sítě nejvyššího napětí. Výkon každé jednofázové jednotky je potom dvojnásobný a pořizovací náklady jsou nižší než v případě, kdy by každý alternátor měl svůj blokový transformátor s oddělenými jednofázovými jednotkami.

Zásadní schema uspořádání, kdy dva alternátory pracují do jednoho transformátoru je např. v obr. 1.28.

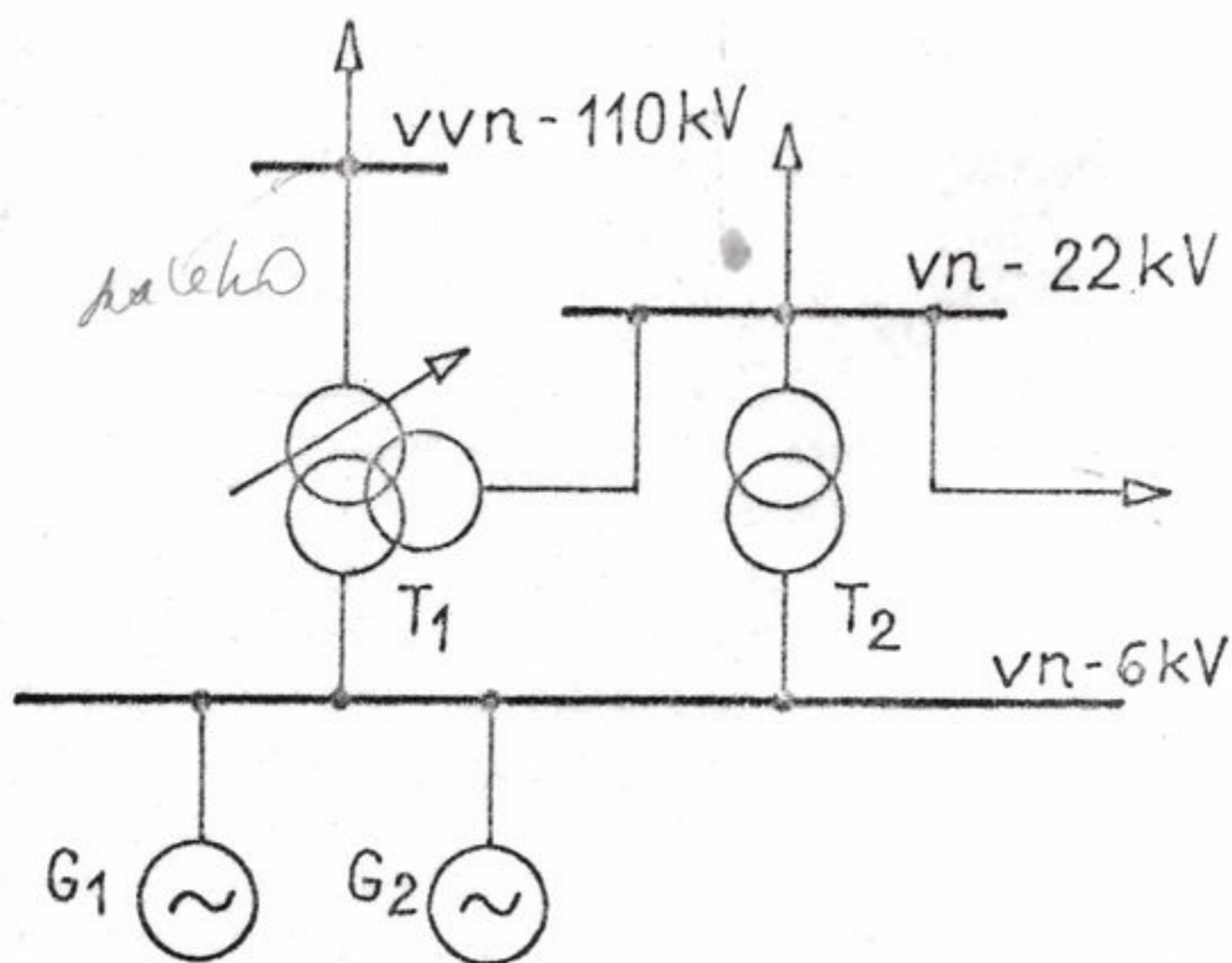
Blokové transformátory jsou vybaveny ochranami, které jsou určeny pro chránění vlastního transformátoru (rozdílová ochrana, plynové relé, ochrana proti přetížení). Vedle toho je blokový transformátor chráněn souborem ochran, který zahrnuje alternátor, blokový transformátor, vyvedení výkonu a transformátor na odbočce alternátoru jako jeden chráněný celek.

Při použití jednofázových skupin je obvykle k dispozici jedna jednotka jako záložní společně pro několik transformátorů. Připojení záložní fáze při poruše kterékoliv jednotky se provádí při přerušení provozu.

Blokové transformátory velkých výkonů pro nejvyšší napětí mají vysoce využitý izolační systém, který vyžaduje dodržování velmi kvalitních technologických postupů při výrobě. Nelze je proto dopravovat v rozebraném stavu a v elektrárně pak tyto postupy nedokonalé improvizovat. Proto se transformátory dopravují na místo určení jako celek s některými demontovanými částmi jako jsou průchodky, chladiče apod. Realizace projektu blokového transformátoru mezního výkonu proto do značné míry závisí na možnostech jeho přepravy při výrobě a dopravě na místo určení. Blokované transformátory jsou provedeny většinou jako olejové s chlazením s nucenou a řízenou cirkulací oleje. Vnější chladičskou soustavu tvoří vzduchové nebo vodní chladiče.

Spojovací transformátory

Spojovací transformátory převádí výkon z přípojnic, do kterých přímo pracují alternátory do elektrizační soustavy; způsob jejich zapojení je na obr. 1.20. Převedení napětí je dán na jedné straně napětím alternátorů (obvykle 6kV), na druhé straně požadavky na přenos a rozvod elektrické energie. Při přenosu výkonu na větší vzdálenosti se volí napětí na vyšší straně nejméně 110 kV, při přenosu elektrické energie do blízké spotřebitelské sítě se volí napětí na výstupní straně vn - 22kV nebo 35 kV. Často může plnit spojovací transformátor u elektrárny obě tyto funkce: vyvedení výkonu do sítě vvn nebo do sítě vn. V těchto případech se proto používají třívíntové transformátory s regulací na straně nejvyššího napětí. Příklad použití třívíntového transformátoru pro vyvedení výkonu malé vodní elektrárny do sítě vvn a vn je na obr. 2.22.



Obr. 2.22. Vyvedení výkonu vodní elektrárny

Spojovací transformátory se obvykle velí dva, jak je uvedeno na obr. 1.20. aby byla vytvořena rezerva pro případ vyřazení jednoho transformátoru z provozu.

V případě, že je u elektrárny jen jeden hlavní transformátor, který pracuje do sítě vvn je třeba vytvořit zálohu pro vyvedení výkonu při vyřazení hlavního transformátoru z činnosti. Na obr. 2.22 je hlavní transformátor T1, záložní transformátor T2 je neregulační.

Výkon spojovacích transformátorů se volí podle bilance výkonů dodávaných do přípojnic s alternátorovým napětím a výkonů z nich odbíraných. Pro případ výpadku alternátoru je třeba, aby výkon spojovacích transformátorů zajišťoval požadovanou spotřebu na přípojnicích do kterých alternátory pracují. Při výpadku jednoho z transformátorů musí zbývající transformátor přenést chybějící výkon na alternátorovém napětí sám s dovoleným využitím havarijního přetížení. Tyto situace se obvykle vyskytují u velkých závodů, které mají vlastní závodní elektrárnu.

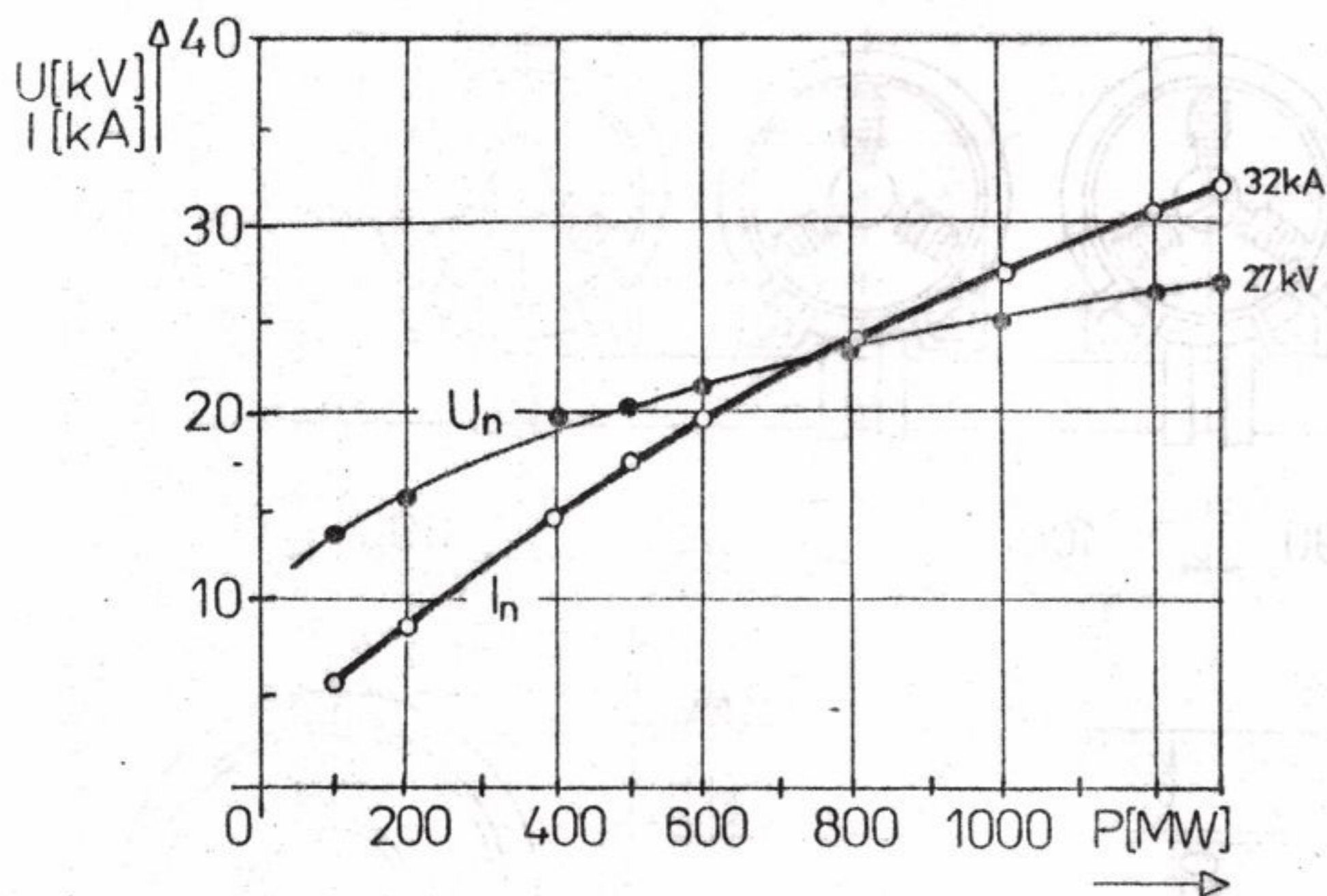
Transformátory pro vlastní spotřebu bloku jsou provedeny jako trojfázové pro venkovní prostředí. Jsou umístěny vedle blokových transformátorů, přívod na primární stranu je v zapouzdřeném provedení stejně jako vývod z alternátoru do blokového transformátoru. Vývod na sekundární straně je proveden z trubkových vodičů s vnější povrchovou izolací a je zaústěn do rozvodny 6 kV, která je uvnitř budovy elektrárny. Transformátory pro vlastní spotřebu mohou být buď regulační s regulací na straně alternátoru a nebo neregulační. Transformátory jsou buď dvouvinuťové nebo třívinuťové s rozštěpeným vinutím na straně spotřeby a napětím 6 kV. Napájení vlastní spotřeby se u třívinuťového transformátoru rozděljuje na dvě sekce se sníženým zkratovým výkonem. Zapojení transformátorů pro vlastní spotřebu je obvykle Ddo u třívinuťových D d0 d0. Kompenzace zemních kapacitních proudů se s ohledem na provedení rozvodu vlastní spotřeby neprovádí. Chránění transformátorů vlastní spotřeby je provedeno individuálně s respektováním charakteru zatížení a koordinovanou činností ochrany ve vztahu k provozním a poruchovým stavům alternátoru, blokového transformátoru a zařízení vlastní spotřeby. Další ochrany jsou součástí komplexního souboru ochrany elektrické části bloku: alternátoru, blokového transformátoru, vyvedení výkonu a odbočky pro napájení vlastní spotřeby.

2.1.3 Vyvedení výkonu z alternátoru

U alternátorů malých a středních výkonů může být provedeno přímé spojení několika alternátorů na přípojnice. Z přípojnic bývá obvykle napájena kabelové rozvody vlastní spotřeby elektrárny nebo průmyslový rozvod elektrické energie velkého závodu. Přímé spojení alternátoru se spotřebou není vhodné, neboť zkratové proudy ze strany spotřeby se přímo přenesou na alternátor. Proto je v těchto případech pro zajištění spolehlivého provozu nutné zařadit reaktor nebo řešit rozvod s mezitransformací.

Vyvedení výkonu u alternátorů menších jednotkových výkonů se provádí pomocí kabelů nebo holých pasových vodičů jednoduchých či složených, upevněných na izolačních podpěrkách. Dimenzování těchto vývodů se provádí podle jmenovitého proudu alternátoru a kontroluje se podle účinků zkratových proudů (dle ČSN 341020 a ČSN 381754). Mezní hodnota výkonu alternátoru pro taková uspořádání je asi 30 MW. U alternátorů středních a velkých výkonů je vyvedení výkonu do elektrizační soustavy prováděno obvykle přes blokový transformátor. Také napájení vlastní spotřeby je uspořádáno tak, že v odbočce od alternátoru je připojen transformátor s jedním nebo dvěma vinutími na sekundární straně. Toto uspořádání má kromě jiných výhod zásadní přednost, kterou je podstatné snížení zkratových proudů.

Růst jednotkových výkonů alternátorů tepelných elektráren zejména u strojů pro jaderné elektrárny je řešen zvyšováním jmenovitých napětí a proudů proti obvykle nižším hodnotám u malých jednotek. Je třeba vidět, že růst napětí probíhá s rostoucím výkonem stroje pomaleji než hodnota proudu, která je těmito parametry (P_n a U_n) určena. Na obr. 2.23 je znázorněn růst hodnot napětí a proudu se zvyšujícím se jednotkovým výkonem alternátorů v ČSSR i ve světové produkci. U velkých jednotek jsou provozní proudy ve vývodu elektrického výkonu srovnatelné se zkratovými proudy současně provozovaných alternátorů menších výkonů.



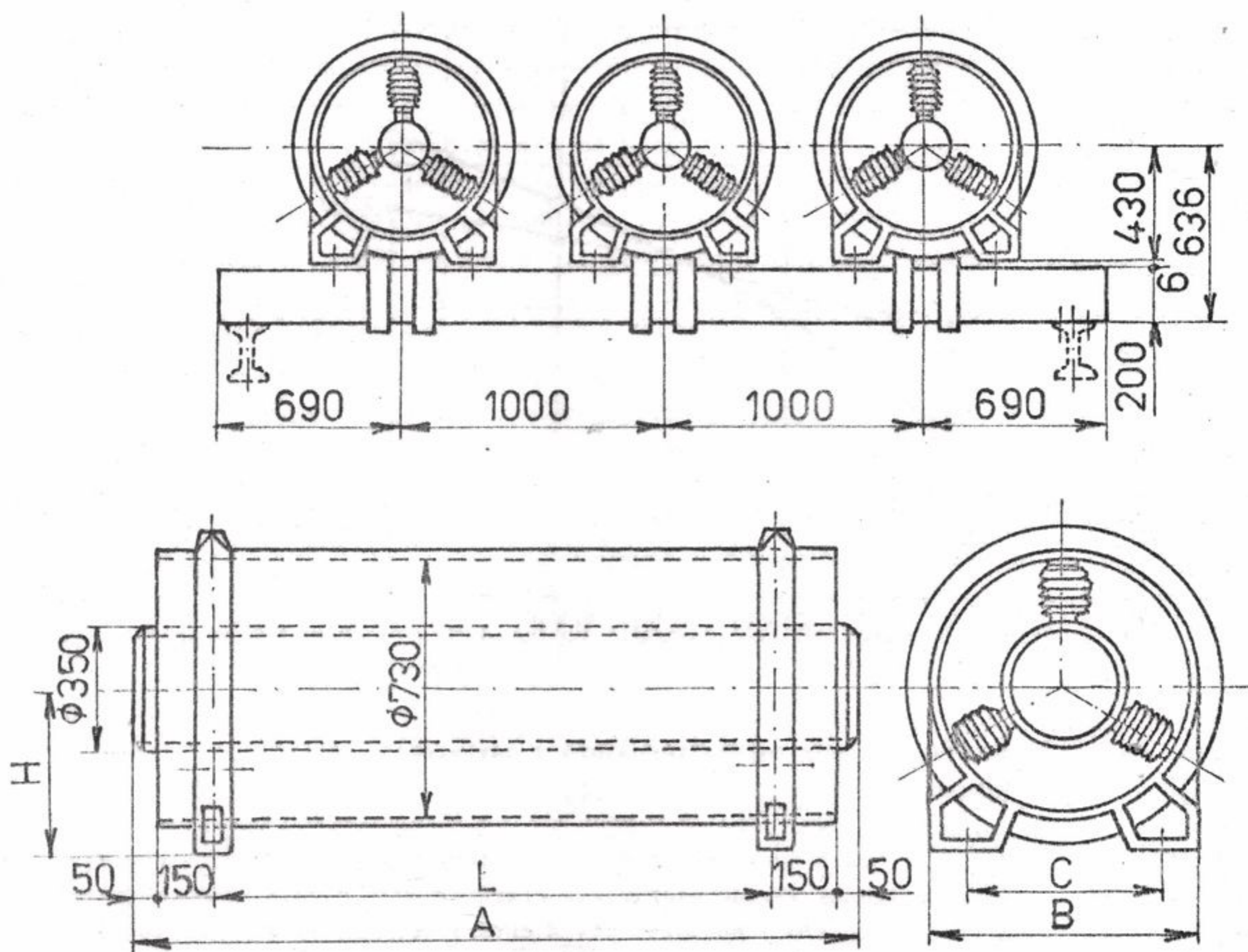
Obr. 2.23. Jmenovitá napětí a proudy turboalternátorů v závislosti na jejich výkonu

Velké zkratové proudy a jejich dynamické i tepelné účinky u velkých alternátorů vyžadují zcela nová řešení uspořádání vývodu elektrické energie. Holá pasová nebo profilová vedení jednotlivých fází se opatřují pouzdry, která chrání mechanicky vlastní vodiče před vznikem zkratu. Kovové pouzdro současně stíní elektromagnetické pole jednotlivých fázových vodičů a umožňuje zvládnout silové účinky proudů při zkratu. Při bezporuchovém provozu s vyšším zatížením by proudy ve vodičích bez stínících pouzder způsobovaly značné zahřívání okolních kovových konstrukcí.

Pouzdro elektrovodu musí být vyrobeno z nemagnetického materiálu, aby se omezily ztráty vířivými proudy na minimum. Nejčastěji používaným materiálem je hliníkový plech o tloušťce stěny 3 ÷ 5 mm, ze kterého se vytváří válcové pouzdra o průměru asi 500 až 1500 mm, délka jednotlivých úseků je 1,5 až 3 m. Profil vlastního vodiče je buď kruhový nebo čtvercový a je upevněn na izolátorových podpěrách uvnitř stínícího pouzdra. Pro provozní proudy nad 20 kA dosahuje průměr vlastních vodičů 800 až 1000 mm.

U konců jednotlivých sekcí je pouzdro zpevněno vnějšími hliníkovými kruhy, které slouží rovněž k uchycení na podpěrnou konstrukci a vzájemnému spojení sekcí. Pouzdra musí být těsná proti vnikání prachu a vlhkosti z vnějšku, případně je třeba zabránit vnikání vody z chladicího okruhu alternátoru.

Na obr. 2.24 je znázorněno provedení zapouzdrěných vodičů pro jmenovitý proud 10 kA.

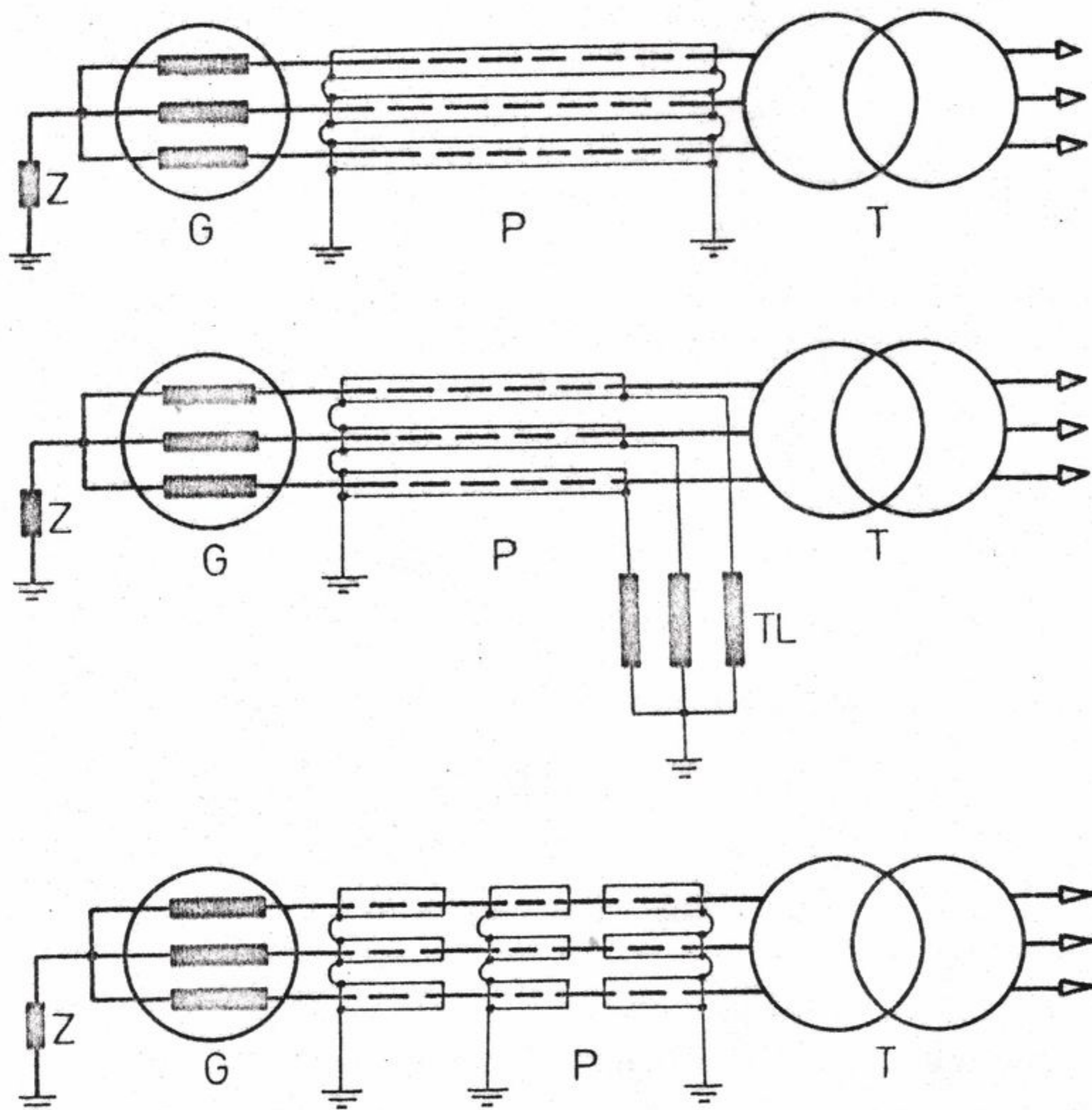


Obr. 2.24. Provedení zapouzdřených vodičů pro
jmenovitý proud 10 kA

Pro posouzení elektrických vlastností zapouzdřených vodičů je třeba uvažovat různé varianty zapojení pouzder, které jsou zásadně tyto :

- a/ vzájemné spojení a uzemnění pouzder na obou koncích celkové délky,
- b/ vzájemné spojení a uzemnění pouzder na jednom konci, přičemž je druhý konec každého pouzdra spojen přes tlumivku do uzlu, který je pak uzemněn,
- c/ pouzdra jsou dělena na kratší, vodivě oddělené úseky a ty jsou potom vzájemně propojeny a uzemněny.

Uvedená uspořádání jsou na obr. 2.25



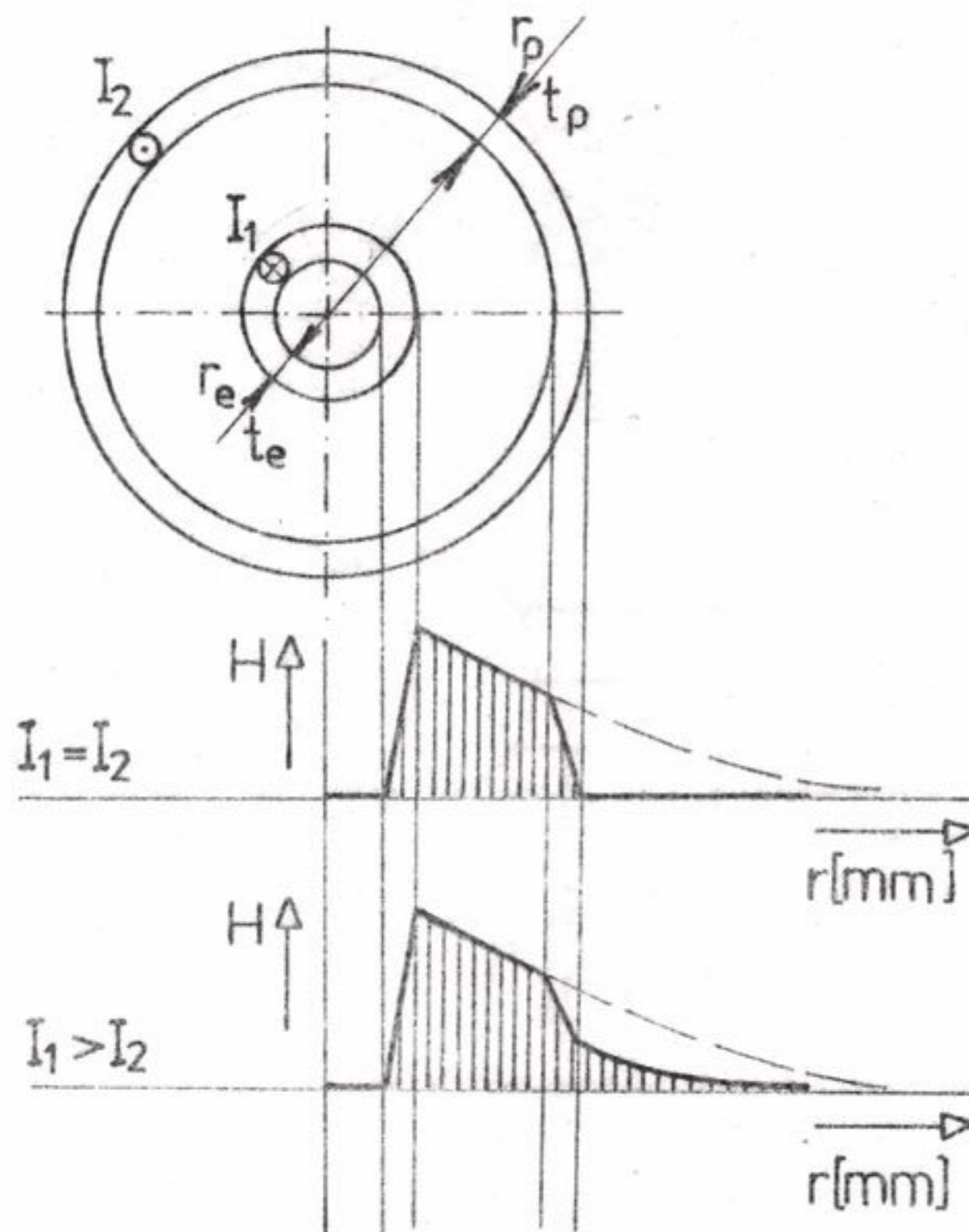
Obr. 2.25. Spojení pouzder vývodu alternátoru

- G ... alternátor
- P ... zapouzdřené vodiče vývodu alternátoru
- T ... blokový transformátor
- TL .. tlumivka se železem
- Z ... impedance mezi uzlem alternátoru a zemí

Při dokonale vodivém propojení pouzder a jejich uzemnění na obou koncích se v pouzdech indukují třífázové proudy, které dosahují hodnot proudu ve fázovém vodiči. Situace je znázorněna na obr. 2.25a).

System fázových vodičů a pouzder je symetrický a rozložení elektromagnetického pole můžeme určit pro jeden vodič a to uvnitř pouzdra a v jeho vnějším okolí.

Výsledné elektromagnetické pole je určeno superpozicí dvou polí, z nichž jedno vytváří vlastní fázový vodič, druhé pole je vytvořeno proudem protékajícím pláštěm. Situace je znázorněna na obr. 2.26.



Obr. 2.26. Rozložení intenzity magnetického pole uvnitř a vně zapouzdřeného vodiče

| | | |
|-------|--|-------|
| kde : | r_p ... vnější poloměr pouzdra | [mm] |
| | t_p ... tloušťka pouzdra | [mm] |
| | r_e ... vnější poloměr fázového vodiče | [mm] |
| | t_e ... tloušťka fázového vodiče | [mm] |
| | I_1 ... proud ve fázovém vodiči | [A] |
| | I_2 ... proud v pouzdře | [A] |
| | H ... intenzita magnet.pole | [A/m] |
| | r ... vzdálenost od osy vodiče | [mm] |

Jestliže je indukovaný proud v pouzdře stejně velký jako ve fázovém vodiči je vnější výsledná intenzita magnetického pole rovna nule. Pouzdro má tedy takový stínící účinek, že vnější účinky zapouzdřených vodičů na sousední fáze i na okolní ocelové konstrukce jsou zcela eliminovány. Jestliže použijeme jiný způsob spojení pouzder, uvedený pod body b/ a c/ kdy proud v pouzdrech úmyslně snižujeme, ($I_1 > I_2$) je výsledné pole vně pouzder nenulové.

Jestliže uvažujeme použití trubkových fázových vodičů a pouzdra ve tvaru válce lze při malé tloušťce stěny obou vodivých částí určit jejich vlastní indukčnost podle vztahů :

$$L_1 = 0,46 \log \frac{a}{r_e} \cdot 10^{-6} \quad [\text{H/m}] \quad \dots \text{ pro fázový vodič} \quad (2.57)$$

$$L_2 = 0,46 \log \frac{a}{r_p} \cdot 10^{-6} \quad [\text{H/m}] \quad \dots \text{ pro pouzdro} \quad (2.58)$$

kde :

a ... je osová vzdálenost fází

System zapouzdrěných vodičů představuje vlastně transformátor s vazbou přes vzduchovou mezeru, ve kterém se do vnějšího pouzdra indukují proudy, které protékají v podélném směru. Proto můžeme psát rovnici pro úbytky napětí :

$$j\omega M I_1 = I_2 (R_2 + j\omega L_2) \quad (2.59)$$

kde :

M ... vzájemná indukčnost [H/m]

R_2 .. ohmický odpor pouzdra [Ω /m]

Velikost proudu indukovaného do pouzdra podle (2.59) :

$$I_2 = I_1 \frac{\omega L_2}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} = I_1 \cdot \frac{X_2}{Z_2} \quad (2.60)$$

kde :

$\omega L_2 = X_2$... reaktance pouzdra

Z ... impedance pouzdra

Ze vztahu (2.60) pak můžeme určit celkový ztrátový výkon pro všechny tři fáze :

$$P_{z_2} = 3 R_2 I_2^2 = 3 R_2 I_1^2 \frac{X_2^2}{Z_2^2} \quad (2.61)$$

Při zkratu jsou dynamické účinky zkratového proudu mezi fázemi vlivem odstínění téměř nulové. Mezi vodičem a pouzdrem téže fáze vznikají při zkratu síly vyvolané vlivem nesouměrnosti proudů procházejících pouzdry. Namáhání izolátorů uvnitř pouzder je menší než ve srovnatelných případech u uspořádání vyvedení elektrického výkonu alternátoru bez zapouzdrění vodičů. Elektrodynamické síly mezi pouzdry mohou být ovšem značné, neboť pouzdra jsou umístěna blízko u sebe. Konstrukce pouzder a jejich uložení musí vytvářet soustavu mechanicky velmi odolnou.

Další způsob spojení pouzder vývodu alternátoru popsany v bodě b/ a znázorněny na obr. 2.25b) spočívá v tom, že na jednom konci se pouzdra vzájemně propojí a uzemní, na druhém konci se spojí se zemí přes tlumivku se železem. Při jmenovitém zatížení má tlumivka velkou reaktanci a značně omezuje proudy v pouzdrech (zhruba na 30%). Při zkratu, kdy proud vzroste na několiknásobek jmenovitého proudu se tlumivka přesytí, její reaktance se zmenší a indukované proudy v pouzdře mohou snadno protékat. Tím se omezí dynamické účinky zkratového proudu protékajícího fázovým vodičem na minimum. Velikost reaktance nenasycené tlumivky určíme úpravou vztahu (2.60) :

$$I_2 = I_1 \frac{X_2}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 (L_2 + L_{t1})^2}} \quad (2.62)$$

Při zanedbání ohmického odporu R_2 a při respektování podmínky omezení průchozího proudu na $30 \cdot I_2$ lze určit indukčnost tlumivky podle (2.58) a (2.62) takto :

$$I_{2r} = I_1 \frac{L_2}{L_2 + L_{t1}}$$

$$L_{t1} = \left(\frac{I_1}{I_{2r}} - 1 \right) L_2 = \left(\frac{I_1}{I_{2r}} - 1 \right) 0,46 \log \frac{a}{r_p} \cdot l_p \cdot 10^{-6} \quad [\text{H}] \quad (2.63)$$

kde :

$l_p \dots$ je délka zapouzdřeného vodiče

$I_{2r} \dots$ je redukováná hodnota proudu v pouzdře

Fokud se rozdělí pouzdra na krátké úseky se samostatným uzemněním, jak je naznačeno v obr. 2.25c), zmenší se podstatně podélné proudy v pouzdrech. Tím se sníží stínící účinek pouzder a zvýší se silové účinky fázových vodičů navzájem. Proudů v pouzdře mají s ohledem na délku úseků charakter vířivých proudů, které lze obtížně stanovit. Tvar magnetického pole je určen proudy ve fázových vodičích a v pouzdrech, jeho výsledný průběh je nepravidelný protože se zde uplatňují okrajové jevy v přechodech mezi úseky.

Pro výpočet ztrát vířivými proudy je v literatuře uváděn vztah :

$$P_{v_2} = 3,12 R_2 \left(\frac{2r_p}{a} \right)^{2,13} \cdot (I_1 - I_2)^2 \quad (2.64)$$

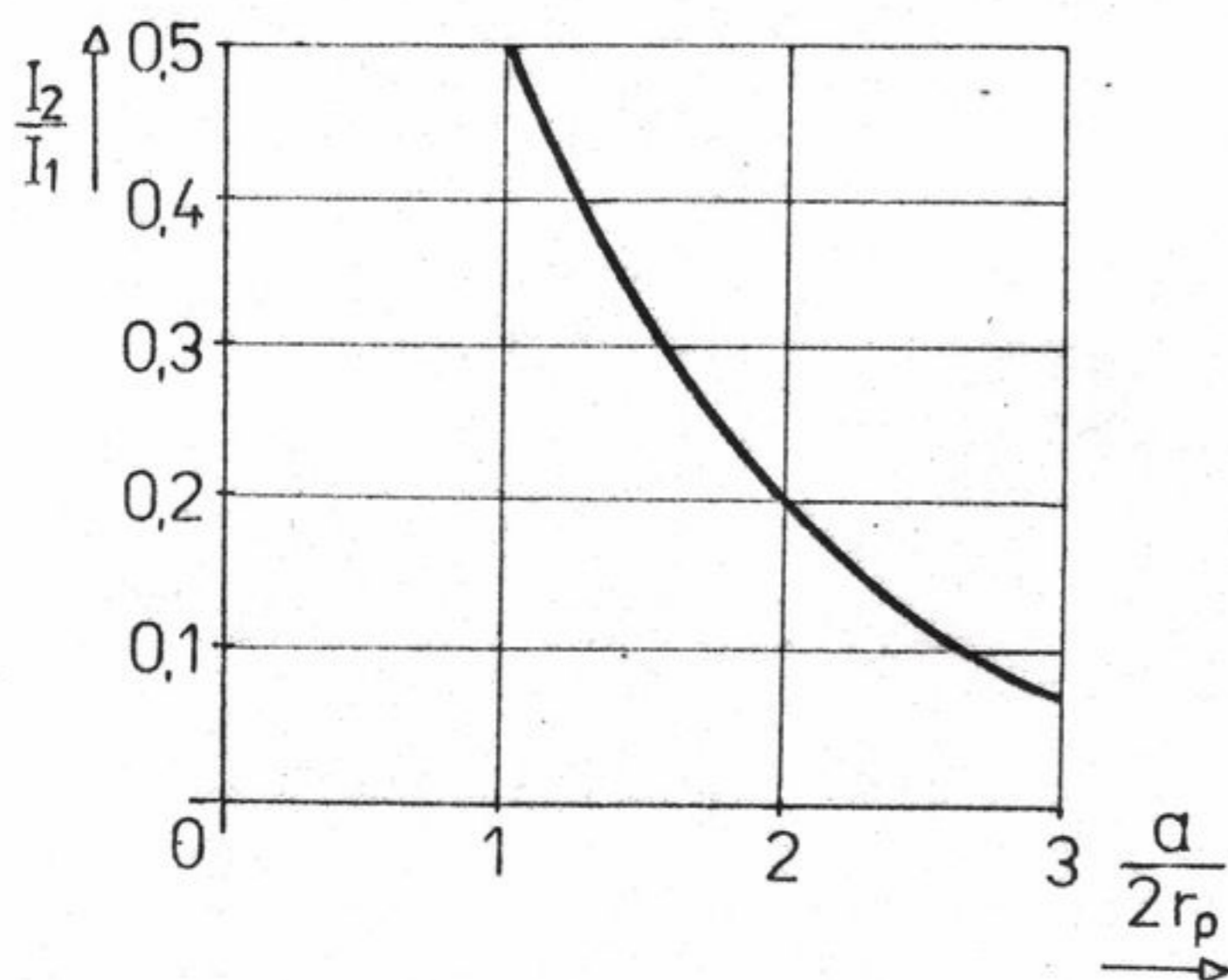
Celkové ztráty v pouzdře jsou dány součtem ztrát způsobených podélnými a vířivými proudy :

$$P_{c_2} = P_{z_2} + P_{v_2} = 3R_2 I_2^2 + 3,12 R_2 \left(\frac{2r_p}{a} \right)^{2,13} \cdot (I_1 - I_2)^2 \quad (2.65)$$

Minimální ztráty můžeme stanovit určením extrému funkce. Derivaci podle I_2 položíme rovnou nule a z tohoto vztahu vychází poměr proudů :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{1 + 0,96 \left(\frac{a}{2r_p} \right)^{2,13}} \quad (2.66)$$

jako nejvýhodnější z hlediska ztrát v pouzdře .



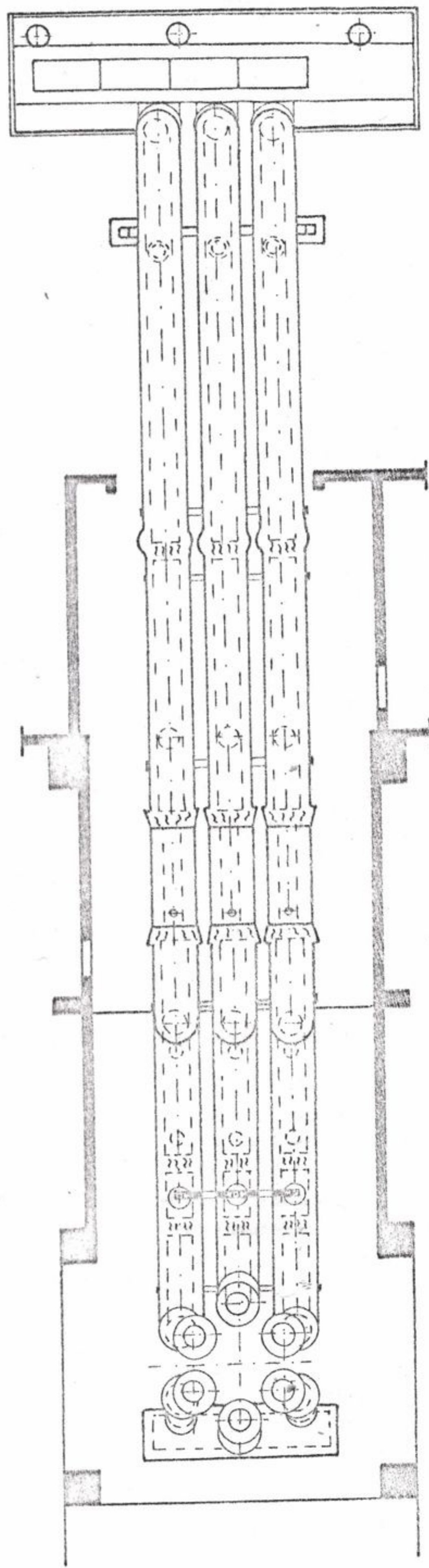
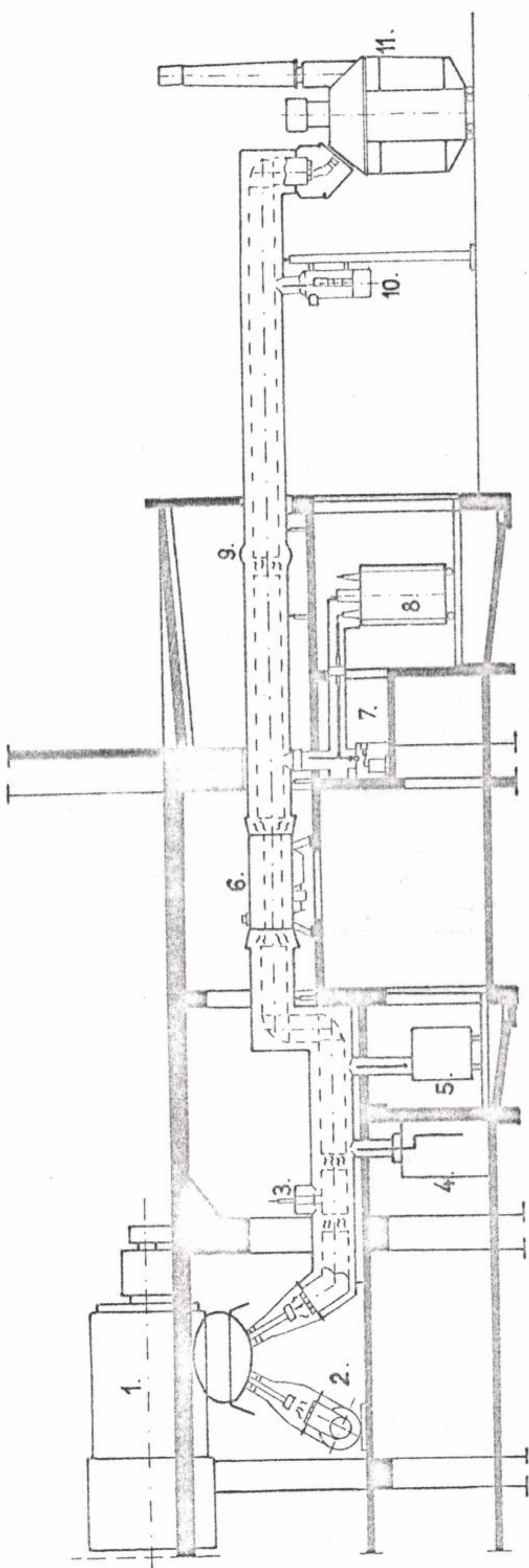
Obr. 2.27. Stanovení optimálního poměru proudů I_1 , I_2 s ohledem na minimální ztráty v pouzdře

Při použití alternátorového vypínače se používá pro zapouzdržené vodiče řešení jednofázové. Při tomto řešení může být umístění vypínačů pod alternátorem ve svislé poloze nebo v trase zapouzdržených vodičů ve vodorovné poloze. V zapouzdrženém provedení jsou i vodiče odbočky pro transformátor vlastní spotřeby, vyvedení nulového bodu alternátoru s měřicími transformátory proudu a další související zařízení.

Jako příklad provedení vývodu alternátoru velkého výkonu je znázorněn na obr. 2.28 pro jmenovitý proud 20 kA.

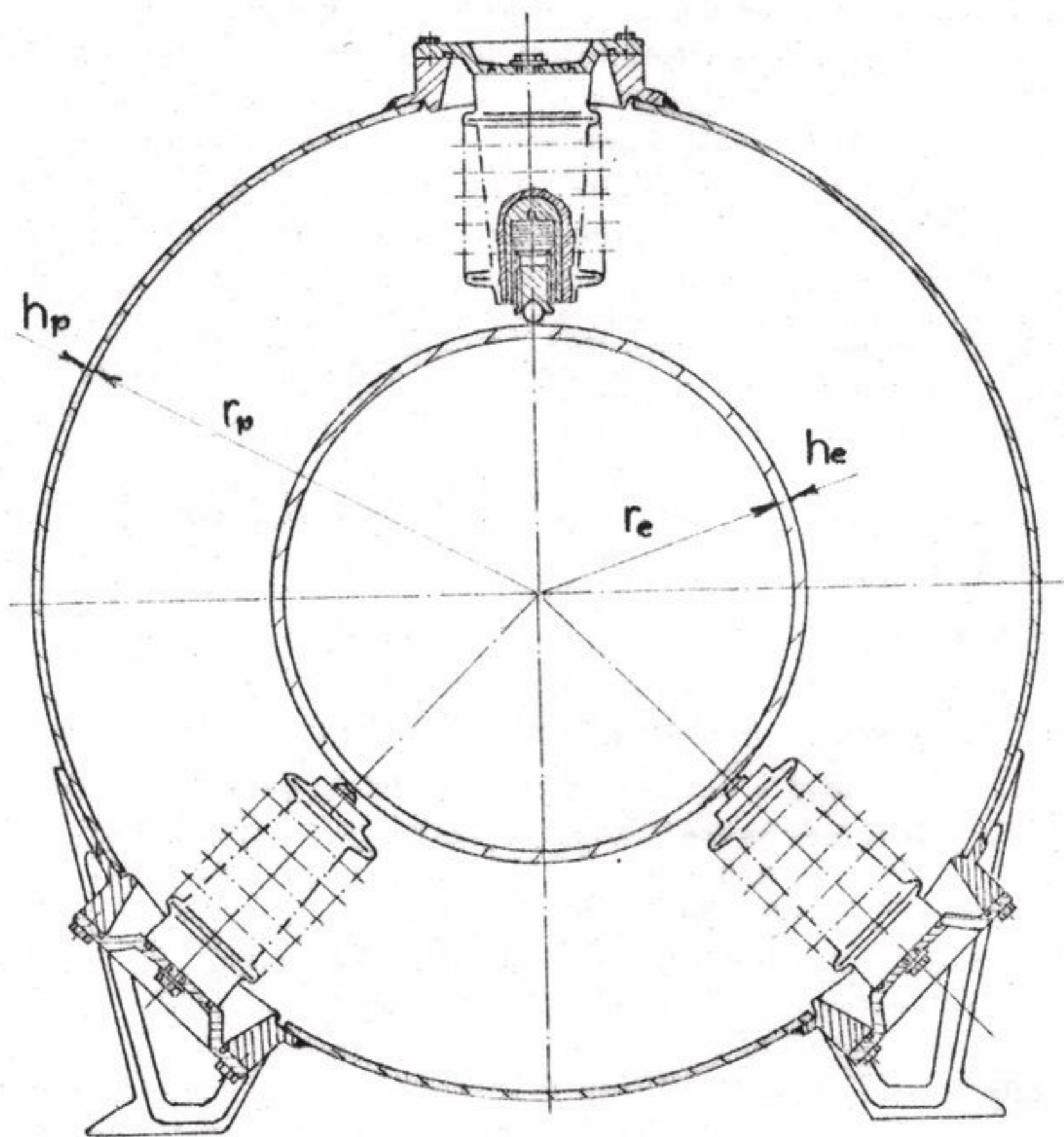
Obr. 2.28. Vývod alternátoru velkého výkonu

1. Alternátor
2. Uzel alternátoru
3. Uzemňovací spínač
4. Kobka měření napětí
5. Transformátor pro napájení budicí soustavy
6. Vypínač alternátoru
7. Kobka měření proudu
8. Transformátor vlastní spotřeby
9. Dilatační spojka
10. Bleskojistka
11. Blokovaný transformátor



Obr. 2. 28. Vývod alternátoru velkého výkonu

Na dalším obr. 2.29 je znázorněno detailní provedení zapouzdřeného vodiče pro jmenovité proudy do 25 kA, odpovídající jmenovitému výkonu alternátoru 1000 MW. Fázový vodič je kruhového profilu a je podepřen třemi izolátorovými podpěrkami, které se montují z vnějšku po svaření a soustředném usazení obou válců montážními otvory. Podpěrné izolátory mají pružné uložení stykových bodů.



Obr. 2.29. Provedení jedné fáze zapouzdřeného vodiče

V následující tabulce jsou uvedeny rozměry pro jmenovitá proudová zatížení zapouzdřeného vodiče dle obr. 2.29.

| Jmenovitý proud [kA] | $2r_e$ [mm] | $2r_p$ [mm] |
|-------------------------|----------------|----------------|
| 3 | 120 | 550 |
| 3 ÷ 8 | 300 | 730 |
| 8 ÷ 12 | 480 | 910 |
| 12 ÷ 18 | 680 | 1110 |
| 18 ÷ 25 | 1000 | 1430 |

Tab. 4.
Rozměry zapouzdřených
vodičů

2.2. Provoz elektrických strojů a zařízení elektráren

V této kapitole budou probrány důležité otázky týkající se provozu alternátorů, transformátorů, motorů a souvisejících zařízení při normálních provozních stavech včetně jejich najíždění a odstavování. Vedle toho budou popsány mimořádné provozní stavy strojů a zařízení ve vztahu k provozu elektrické části elektráren. Řešení těchto otázek je úzce spojeno s provozem strojního zařízení elektráren jak při najíždění a odstavování elektrárny, tak i při provozu za normálních podmínek nebo při poruchových stavech.

Jelikož je do elektrizační soustavy vyveden elektrický výkon elektráren a ze soustavy jsou zajišťovány napájecí systémy vlastní spotřeby elektráren při najíždění, odstavování a při havarijních stavech, musí být respektovány souvislosti mezi elektrickými stroji, zařízeními elektráren a elektrizační soustavou.

Pro konkrétní podmínky provozu elektráren jsou zpracovány " místní provozní a pracovní předpisy " ve kterých jsou obsaženy pokyny pro provoz zařízení a činnost obsluhy zařízení. Tyto předpisy vychází zejména z těchto základních ustanovení, norem, směrnic a znalostí :

- Československé státní normy pro jednotlivé stroje a zařízení, ve kterých jsou zakotveny základní parametry a podmínky provozu,
- oborové normy a předpisy pro elektrárny a sítě ,
- znalosti konstrukce a technologie výroby jednotlivých strojů a zařízení včetně provozních zkušeností s obdobnými zařízeními v předchozí době,
- zkoušky a měření výrobců, uživatelů a organizací výzkumného i aplikačního charakteru, které určují důležité ukazatele pro provoz jednotlivých částí nebo celků elektráren.

V této části budou probírány otázky provozu elektrozařízení v ustálených podmínkách. Přechodné jevy, problémy přepětí a izolačních hladin jsou probírány v jiných předmětech stejně jako otázky rozvodných zařízení, jejich konstrukce, dimenzování a provoz.

Najíždění elektrárenských bloků

Doba potřebná k najetí elektrárenského bloku je určena převážně vlastnostmi strojního zařízení, turboalternátory velkých jednotkových výkonů mají pouze malý vliv na prodloužení celkové doby najíždění. Z ekonomických důvodů jsou požadovány krátké doby spouštění. Pro spouštění elektrárenských bloků požadujeme proto z hlediska potřeb elektrizační soustavy metody, které umožňují starty s využitím plných pevnostních a deformačních možností materiálu jednotlivých technologických celků při zcela bezpečném a hospodárném provozu v projektované životnosti zařízení.

2.2.1 Provoz alternátoru

Najíždění turboalternátoru

U turboalternátorů velkých jednotkových výkonů je třeba věnovat pozornost teplotním stavům při najíždění a postupném zatěžování tak, aby nedošlo k deformaci vinutí, případně jiným poruchám a poškozením. Je třeba sledovat provoz alternátoru při najíždění také v souvislosti s funkcí jeho pomocných zařízení zejména chladicích systémů a olejového hospodářství.

Při normálním najíždění se alternátor roztáčí společně s rotorem poháněcí turbíny, při dosažení jmenovitých otáček se nebudí a přifézuje k síti. Poté dochází k postupnému

zatěžování alternátoru činnou i jalovou složkou zatížení, určující proudové zatížení rotorového a statorového vinutí alternátoru. Při zatěžování alternátoru dochází k růstu teploty vinutí i postupnému oteplování tělesa rotoru a železa statoru. Z hlediska rozložení teplot je třeba posuzovat poměrně složitou soustavu s různými materiály a odlišnými vodivostmi, kde vedle akumulace tepla dochází k odvádění tepla chladícím médiem. Obecně je však možno konstatovat, že teplota vinutí bude vždy vyšší než teplota tělesa rotoru nebo teplota magnetického obvodu statoru. Stejně tak rychlost vzrůstu teploty při postupném zatěžování bude vždy větší ve vinutí než u ocelových částí, pomí-
neme-li různé mimořádné stavy při provozu alternátoru.

Je-li teplota měděného vinutí rotoru vyšší než je teplota tělesa rotoru, vinutí se prodlužuje o větší délku než se prodlouží ocelové těleso rotoru a to také proto, že teplotní součinitel prodloužení mědi je větší než u oceli. U dlouhých rotorů způsobuje nestejná teplota vinutí posuvy částí vinutí v drážce, případně deformace v čelech budícího vinutí. Trvalé deformace budícího vinutí mohou vzniknout po odstavení plně zatíženého alternátoru, kdy při ochlazování dochází k nestejnému zkracování vodičů. V dnešní době se pro budící vinutí používá mědi se zvýšenou mezí pružnosti, což přináší omezení uvedených nepříznivých jevů.

Fázování synchronních alternátorů

Po dosažení synchronních otáček turboalternátoru a jeho nabuzení na jmenovité napětí je třeba provést připojení alternátoru k elektrizační soustavě a zabezpečit jeho paralelní synchronní chod s ostatními alternátory. Fázování alternátoru, které je jednou ze základních provozních manipulací, musí probíhat tak, aby při něm nedošlo k nadměrným proudovým a momentovým rázům. V dnešní době se vesměs používá přesný způsob fázování, kdy je třeba, aby byly splněny tyto základní podmínky :

- stejný kmitočet napětí sítě a napětí alternátoru,
- stejné napětí alternátoru a sítě, .
- nulový fázový posun mezi fázorem napětí alternátoru a fázorem napětí sítě,
- stejný sled fází alternátoru a sítě .

Přesné dodržení všech těchto podmínek v provozu není reálné neboť by značně prodlužovalo fázování a jsou proto dovoleny určité odchylky :

- odchylka absolutní hodnoty napětí sítě od napětí alternátoru,
- odchylka fázového posunu napětí sítě a alternátoru,
- odchylka kmitočtu alternátoru od kmitočtu sítě.

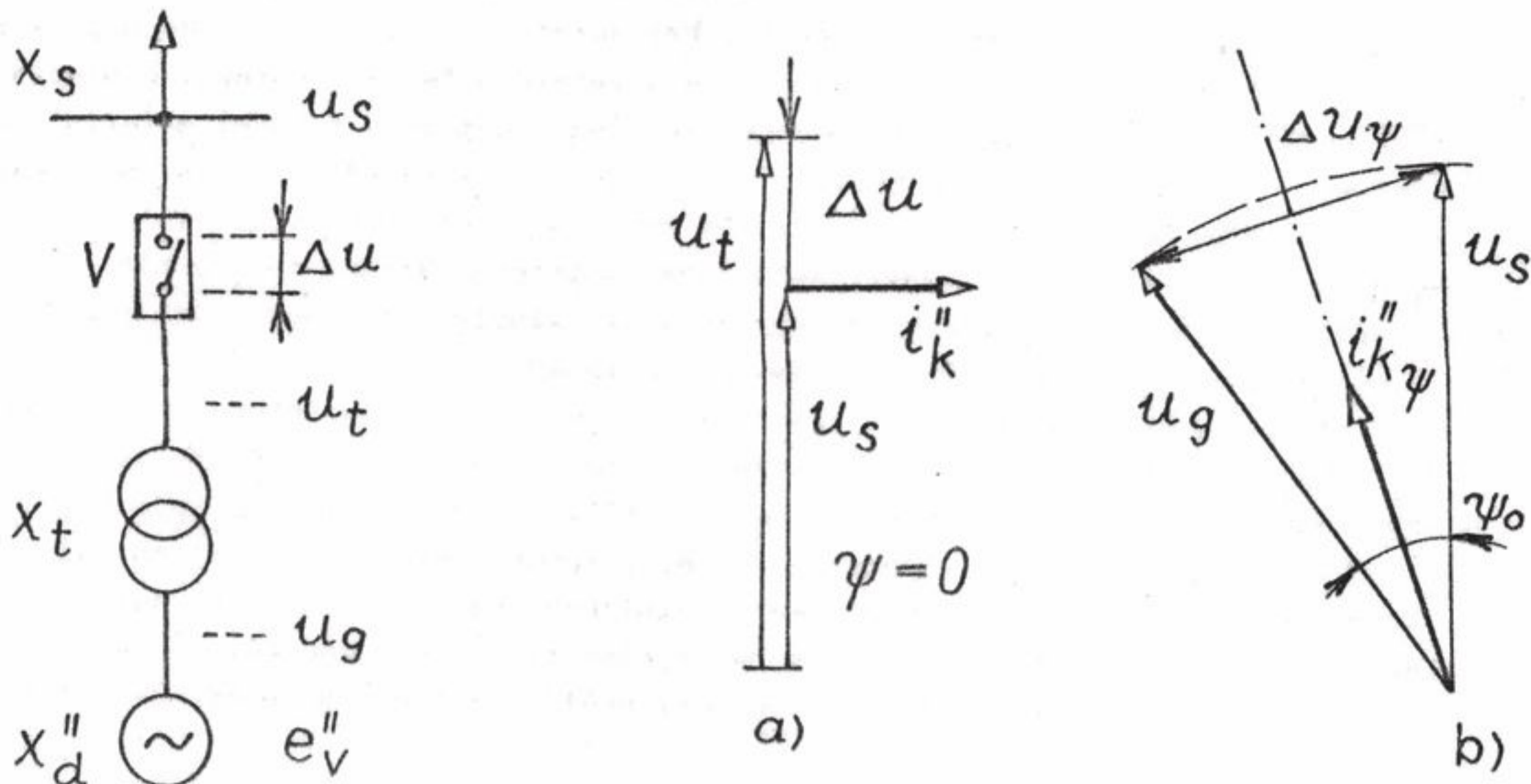
a/ Odchylka absolutní hodnoty napětí

Při fázování s odchylkou napětí, kdy jsou všechny ostatní podmínky splněny, je fázor napětí alternátoru u_g a fázor napětí u_s ve fázi a liší se pouze svojí hodnotou. Při posuzování poměrů uvažujeme pouze reaktance jednotlivých prvků systému. Na obr. 2.30a) je situace při fázování alternátoru při nestejně velikosti napětí alternátoru a napětí sítě. Elektrizační soustavu uvažujeme jako zdroj nekonečného výkonu, takže její náhradní reaktance se rovná nule.

Proudový ráz ,který vznikne v okamžiku zapnutí vypínače V bude jalového charakteru .

Při fázování nezáleží na tom, zda je vypínač mezi alternátorem a blokovým transformátorem, nebo se fází pomocí vypínače za blokovým transformátorem (na straně vvn).

Elektrizační soustava



Obr. 2.30. Fázování alternátoru při odchylce napětí

kde :

X_s ... náhradní reaktance elektrizační soustavy

u_s ... napětí sítě

Δu ... rozdíl absolutních hodnot napětí

X_t ... reaktance transformátoru

u_g ... napětí na svorkách alternátoru

X_d'' ... rázová reaktance alternátoru

Všechny hodnoty jsou uvažovány v poměrných jednotkách . Proudový ráz v okamžiku zapnutí bude mít velikost :

$$i_k'' = \frac{e_v'' - u_s}{X_d'' + X_t} \quad (2.67)$$

Před sepnutím vypínače V , kdy alternátor není zatížen, jsou nulové úbytky napětí na reaktancích X_d'' a X_t a vnitřní napětí stroje je rovnou napětí na svorkách alternátoru a napětí za blokovým transformátorem.

Proudový ráz je tedy :

$$i_k'' = \frac{u_s - u_t}{X_d'' + X_t} = \frac{\Delta u}{X_c} \quad (2.68)$$

kde :

$$X_c = X_d'' + X_t$$

Prakticky se fází při odchylkách napětí 5%, při poruchách se připouští odchylka napětí 20 %.

Například pro : $\Delta u = 0,2$
 $X_d'' = 0,154$
 $X_t = 0,12$

je proudový náraz podle (2.68) $I_k'' = 0,78 I_n$. Je-li fázování provedeno u alternátoru s blokovým transformátorem. Při přifázování alternátoru, který pracuje bez blokového transformátoru bude za stejných předpokladů proudový náraz :

$$I_k'' = \frac{\Delta u''}{x_d} = \frac{0,2}{0,154} = 1,29 I_n$$

Před přifázováním se reguluje napětí alternátoru na vyšší napětí než je napětí sítě, aby alternátor dodával po připojení k síti jalový výkon do elektrizační soustavy.

b) Odchylka fázového posunu

Při fázování alternátoru k síti předpokládáme určitý fázový posun ψ_0 mezi fázorem napětí alternátoru a fázorem napětí sítě při splnění všech ostatních podmínek přesného fázování. Na obr. 2.30 b) je fázorový diagram pro poměry v prvním okamžiku fázování (zapnutí vypínače V). Předpokládáme, že alternátor fázujeme na mohutnou elektrizační soustavu ($x_g = 0$), absolutní hodnoty napětí alternátoru a sítě jsou stejné ($|u_g| = |u_g|$), podélná a příčná reaktance alternátoru je stejná ($x_d'' = x_q''$).

$$i_{k\psi}'' = \frac{\Delta u \psi}{x_d'' + x_t} = \frac{2u_g}{x_d'' + x_t} \cdot \frac{\sin(\psi_0)}{2} \quad (2.69)$$

Proudový náraz je činného charakteru - podle obr. 2.30 b) je vidět, že při malém fázovém posunu ψ_0 je směr proudu $i_{k\psi}''$ téměř shodný se směrem fázoru napětí u_g .

Činný výkon působí urychlování rotačních hmot stroje, jehož fázor napětí je zpožděn.

~~Proto jsou proudové rázy vznikající při fázování s odchylkou fázového posunu pro alternátor mnohdy horší než rázy způsobené odchylkou napětí.~~

Odchylka fázového posunu, při níž je počáteční rázový proud roven jmenovitému proudu alternátoru určíme podle vztahu (2.69) pro : $u_n = 1,0$

$$i_n = 1,0$$

$$x_d'' = 0,154$$

$$i_n = \frac{2}{0,154} \sin \frac{\psi_0}{2}$$

Úhel $\psi_0 = 8,83^\circ$ platí pro fázování alternátoru bez blokového transformátoru. Při fázování alternátoru s blokovým transformátorem jsou poměry příznivější. Odchylka fázového posunu při níž je $i_{k\psi}'' = i_n$ je podle vztahu (2.69) pro $x_t = 0,12$:

$$i_n = \frac{2}{0,154 + 0,12} \sin \frac{\psi_0}{2}$$

$$\text{Výsledná hodnota úhlu } \psi_0 = 15,75^\circ$$

Proudy a momenty vznikající při fázování, kdy nejsou splněny podmínky přesného fázování mohou dosahovat značných hodnot.

Proud $i_{k\psi}''$ bude maximální pro $\psi_0 = 180^\circ$. Pro jmenovité napětí na svorkách alternátoru podle (2.69) :

$$i_{k\psi}'' \text{ max} = \frac{2 \cdot u_g}{x_d'' + x_t} = \frac{2}{0,154 + 0,12} = 7,29$$

což je

hodnota maximálního proudového rázu pro $\psi_0 = 180^\circ$ při fázování s blokovým transformátorem. Maximální dovolené namáhání, pro které je alternátor navržen a konstruován, je dynamické namáhání při zkratu na jeho svorkách. Nárazový zkratový proud :

$$i_{km} = K \cdot \sqrt{2} i_{ko}'' \quad (2.70)$$

Pro zkrat na svorkách alternátoru je $K = 1,95$ (dle ČSN 333020)

Rázový zkratový proud na svorkách alternátoru :

$$i_{ko}'' = \frac{e_y''}{X_d} = \frac{1,1}{0,154} = 7,14$$

Nárazový zkratový proud podle (2.70) :

$$i_{km} = 1,95 \cdot \sqrt{2} \cdot 7,14 = 19,69$$

Poměr maximální hodnoty proudu při nesynchronním zapnutí alternátoru na síť k nárazovému zkratovému proudu musí být roven 1 :

$$\frac{i_{k\psi_{od}}}{i_{km}} = \frac{\frac{2}{X_d} \sin \frac{\psi_{od}}{2} \cdot K \cdot \sqrt{2}}{\frac{1,1}{X_d} \cdot K \cdot \sqrt{2}} = 1 \quad (2.71)$$

z toho :

$$\sin \frac{\psi_{od}}{2} = \frac{1,1}{2} = 0,55$$

$$\psi_{od} = \underline{66,73^\circ}$$

Při tomto fázovém posunu fázorů napětí alternátoru a sítě bude alternátor při fázování alternátorovým vypínačem namáhán stejně jako při svorkovém zkratu.

c/ Rozdílný kmitočet alternátoru a sítě ✓

Bude-li kmitočet alternátoru v okamžiku připojení k elektrizační soustavě odlišný, bude se rotor alternátoru po sfázování urychlovat nebo brzdít podle toho, jestli je kmitočet alternátoru menší nebo větší než kmitočet sítě.

Obvykle se fázování alternátoru provádí při vyšších otáčkách alternátoru než jsou synchronní otáčky sítě v rozsahu 0,2 ÷ 0,8 % jmenovitých otáček. Tato hodnota je dána možnostmi vyrovnání přebytku kinetické energie rotoru alternátoru s brzdícím elektrickým momentem elektrizační soustavy. Při velkém rozdílu frekvence alternátoru a sítě by rotor alternátoru mohl po sfázování provést několik obrátek proti synchronní rychlosti otáčení soustavy.

Impuls na sepnutí vypínače musí být vydán s určitým předstihem úhlu (resp. času), neboť vlastní doba funkce vypínače a ovládacích prvků způsobí zpoždění mezi povelům k přifázování a spojením kontaktů vypínače. Odhad rychlosti otáčení ručičky synchronoskopu a úhlu předstihu povelu k přifázování při ručním fázování provádí operátor na dozorně. Při přípustném rozdílu frekvencí alternátoru a sítě je rychlost otáčení asi 3 až 6 otáček za minutu (to znamená, že jedna otáčka ručičky synchronoskopu trvá 20 sec resp. 10 sec).

Operátor na dozorně dává impulsy na urychlení turbíny tak, až jsou splněny uvedené podmínky pro přesné fázování.

Při automatickém fázování fázovač vyhodnocuje rozdíl kmitočtů obou systémů, fázový posun napětí alternátoru a sítě, velikost napětí alternátoru a sítě a při velkém rozdílu frekvence obou fázovaných systémů vyhodnocuje podmínky fázování určené rychlostí vypínače. Způsob přesného fázování lze hodnotit jako vhodný z hlediska malých proudových i momentových rázů, které vznikají při připojení alternátoru na síť, jestliže bylo fázování správně provedeno. Doba potřebná k přesnému fázování je v případech systémových poruch, kdy se kmitočet a napětí mění, poměrně dlouhá a přifázování alternátoru nebo spojování menších oddělených soustav je ztíženo. Při ručním řízení jsou kladeny nároky na spolehlivou a zodpovědnou práci operátora při fázování alternátoru. Při automatickém provozu jsou obdobné požadavky vyžadovány od všech automatik, podílejících se na realizaci postupu přesného přifázování alternátoru k elektrizační soustavě.

Samosynchronizace

Při tomto způsobu fázování se alternátor roztočí na otáčky blízké synchronním a v nenabuzeném stavu se zapne na síť. Po připojení se alternátor okamžitě přibudí a vtáhne se do synchronismu. Při samosynchronizaci dochází vždy k proudovému rázu, protože se nenabuzený stroj připojí na plné napětí sítě. Tento proudový ráz je jalového charakteru a v prvním okamžiku je jeho velikost :

$$i_k'' = \frac{u_s}{x_d'' + x_t} \quad (2.72)$$

pro případ přifázování alternátoru vypínačem za blokovým transformátorem.

Při zapínání alternátoru na síť samosynchronizací musí být budící vinutí v okamžiku připojení spojeno nakrátko, aby na kroužcích nevznikalo přepětí.

Hlavní nevýhody při samosynchronizaci jsou :

- proudové a momentové rázy,
- pokles napětí na svorkách alternátoru a ve vlastní spotřebě bloku při fázování na menší soustavu nebo při fázování přes velkou reaktanci.

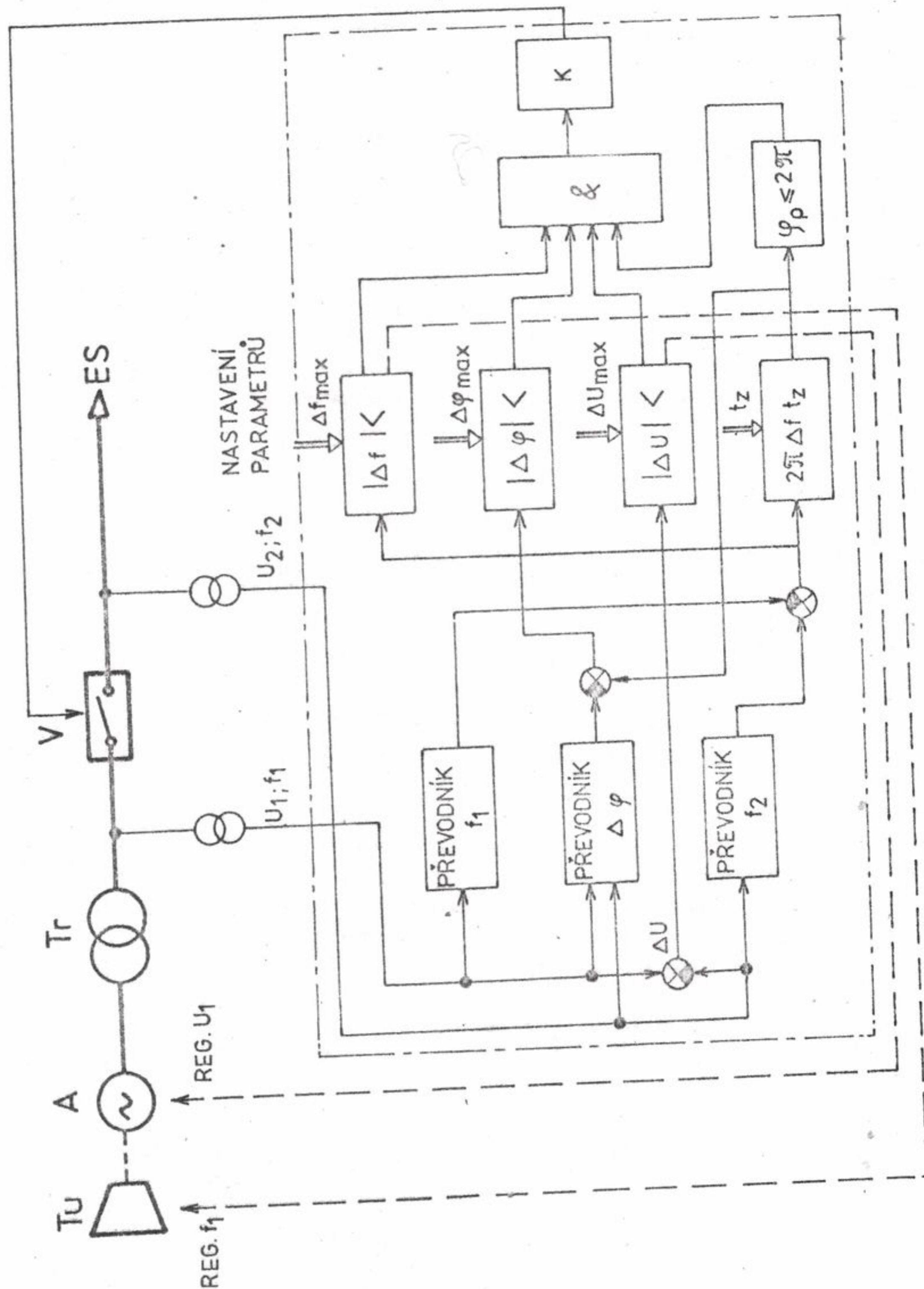
Výhody samosynchronizace jsou :

- možnosti rychlého přifázování při systémových haváriích, kdy dochází k hlubokým poklesům napětí a kmitočtu,
- krátká doba přifázování i za ztížených podmínek pro přesné přifázování (při kolísání kmitočtu a napětí) ,
- poměrně jednoduché manipulace a automatiky ve srovnání s přesným fázováním.

V naší elektrizační soustavě se za normálních podmínek používá metody přesného fázování, metoda samosynchronizace se uvažuje jako možná při haváriích v soustavě.

Princip fázovače

Na obr. 2.31. je zásadní zapojení fázovače pro spínání alternátoru s elektrizační soustavou.



Obr. 2.31. Zásadní schéma fázovače

Alternátor je nutno připojit k síti při splnění základních fázovacích podmínek v okamžiku nejmenšího fázového posuvu napětí U_1 a U_2 . Předpokládáme, že fázovací podmínky jsou splněny při malých odchylkách sledovaných hodnot. Předpokládáme, že $\omega_2 > \omega_1$, pak vzájemný úhlový kmitočet $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$. Zapnutí musí nastat v okamžiku, kdy je nulový fázový posun obou napětí :

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0 \quad (2.73)$$

Za dobu t_z potřebnou k zapnutí vypínače V se vzájemná poloha fázorů U_1 a U_2 změní o úhel :

$$\varphi_p = \Delta\omega \cdot t_z = 2\pi\Delta f \cdot t_z \quad (2.74)$$

Fázoveč musí vyslat zapínací povel s předstihem φ_p . Prakticky je rozdíl kmitočtu při fázování asi $0,1 \div 0,5$ Hz. Potřebná doba předstihu se nastavuje ve stupních v rozsahu $0,1$ až $0,5$ sec. Aby bylo sfázování vůbec možné, musí být splněna podmínka :

$$\varphi_p \leq 2\pi \quad (2.75)$$

Z podmínky (2.75) je zřejmé, že dovolený rozdíl kmitočtu je omezen dobou vypínače t_z

$$\Delta f_{\max} \leq \frac{1}{t_z} \quad (2.76)$$

Při velmi malém rozdílu Δf není nutné zavádět ve fázovací smyčce pro fázový předstih φ_p . Při fázování alternátoru se používá synchronizátoru, který reguluje otáčky turbosoustrojí podle požadovaného rozdílu frekvence. Regulátor napětí vyrovnává rozdíl napětí mezi alternátorem a sítí podle hodnoty ΔU .

Pracovní oblast turboalternátoru ✓

Vymezení pracovní oblasti alternátoru při různých provozních stavech je určeno omezujícími faktory, z nichž jsou nejzávažnější tyto :

- oteplení budícího vinutí,
- oteplení statorového vinutí,
- oteplení železa statoru,
- oteplení tělesa rotoru,
- statická stabilita alternátoru.

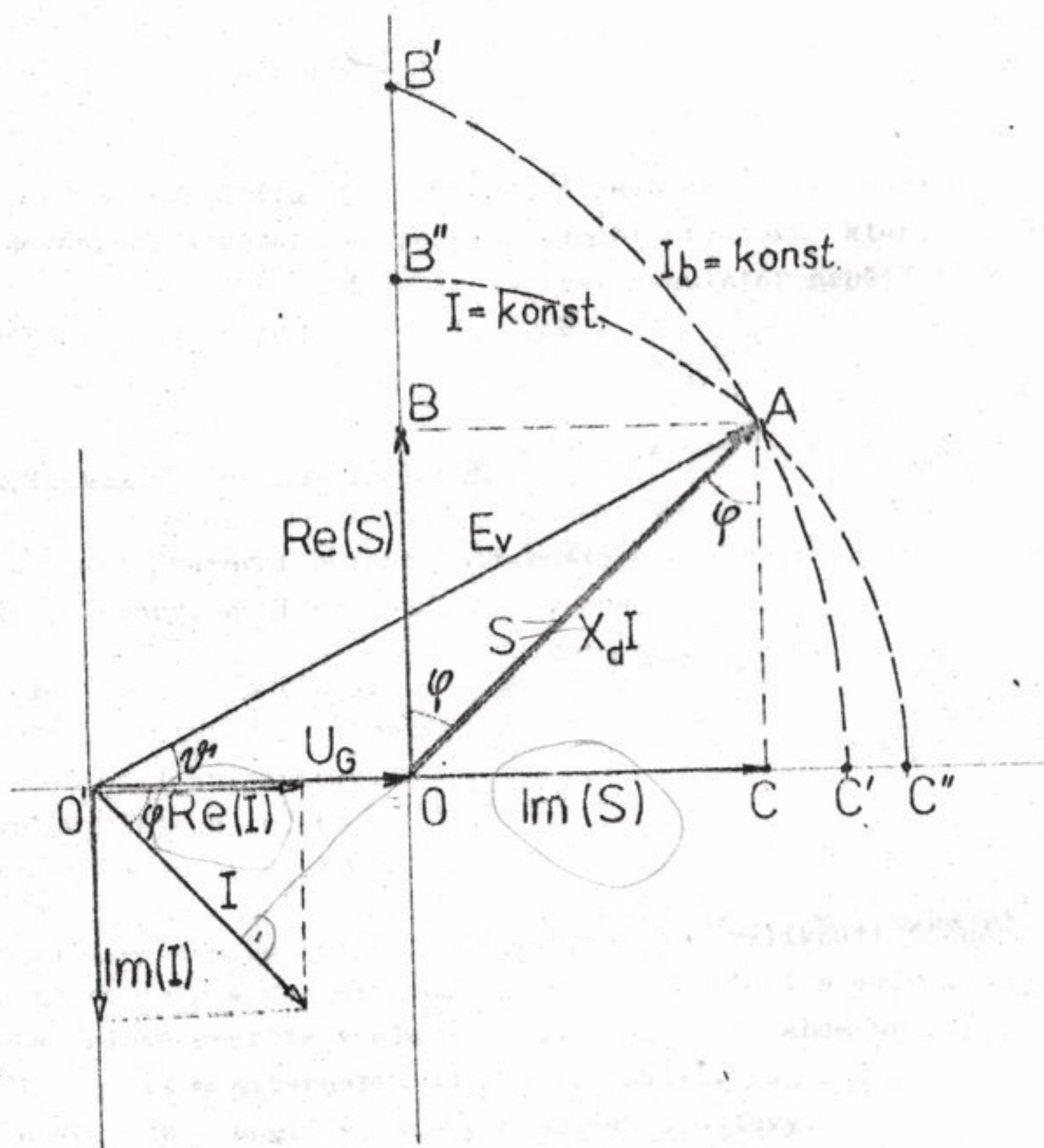
Provoz alternátoru je nutné řídit nejen podle velikosti činného výkonu dodávaného do sítě, ale je nutno také sledovat podíl jalového zatížení a směr toku jalové energie. Protože je spotřeba jalové energie v elektrizační soustavě během určitých časových úseků proměnná, proto je třeba mít u alternátorů k dispozici určitý regulační rozsah jalového výkonu k udržení stanovených mezí napětí v uzlových bodech soustavy. Z hlediska dispečerského řízení elektráren a přenosových sítí je vedle otázky řízení napětí nutno sledovat ekonomii přenosu jalové energie a s tím související zatěžování jednotlivých alternátorů a elektráren jalovým výkonem.

ní stavy alternátoru při jmenovitém budícím proudu I_{bn} .

Vzdálenost středů kružnice $\overline{O'O'}$ je úměrná velikosti budícího proudu naprázdno I_{b0} . Přímka procházející bodem A rovnoběžně s osou imaginární složky proudu $I_m(I)$ představuje provozní stavy alternátoru při konstantním činném výkonu $P = \text{konst.}$ Obdobně pak přímka procházející bodem A rovnoběžně s osou reálné složky proudu I představuje provozní stavy alternátoru při konstantním jalovém výkonu. Změna činného nebo jalového zatížení se v tomto diagramu projeví změnou polohy fázoru proudu I a změnou jeho velikosti. Osy $\text{Re}(I)$ a $\text{Im}(I)$ rozdělují rovinu na čtyři kvadranty. V I. a II. kvadrantu pracuje alternátor v generátorickém chodu, ve III. a IV. kvadrantu pracuje jako motor. Z hlediska jalových výkonů vidíme, že ve II. a III. kvadrantu odebírá alternátor jalový výkon ze sítě, v I. a IV. kvadrantu jalový výkon do sítě dodává.

Úbytek napětí na synchronní reaktanci X_d . I určuje polohu fázoru vnitřního napětí stroje E_v a velikost zátěžného úhlu ψ . Kolmo na vnitřní napětí je orientován fázor budícího proudu I_b .

Na dalším fázorovém diagramu na obr. 2.33 je naznačen přechod z proudového diagramu na výkonový diagram. Původní proudový diagram je orientován podle polohy fázoru svorkového napětí U , takže osa $\text{Re}(I)$ leží ve stejném směru jako U , osa $\text{Im}(I)$ je kolmá ke směru napětí U . Charakter zatížení alternátoru je dán poměrem $\text{Re}(I)$ a $\text{Im}(I)$



Obr. 2.33. Výkonový fázorový diagram alternátoru

V diagramu zakreslíme stejným způsobem jako na obr. 2.32 úbytek napětí na synchronní reaktanci X_d a vnitřní napětí stroje E_v . Z diagramu je patrné, že úbytek napětí $I X_d$ odpovídá zdánlivému výkonu alternátoru S . Úhel ψ , určený charakterem zatížení pak udává

orientaci reálné složky výkonu $\text{Re}(S) \equiv P = S \cdot \cos \varphi$ a imaginární složky výkonu $\text{Im}(S) \equiv Q = S \cdot \sin \varphi$. V tomto smyslu je také zakreslen provozní diagram alternátoru ve shodě s proudovým diagramem alternátoru. To znamená, že kružnice opsané ze středu O představují provoz alternátoru při $I = \text{konst}$; kružnice opsané ze středu O' provoz alternátoru při $I_b = \text{konst}$. Pro vymezení dovolených oblastí alternátoru zakreslujeme kružnice tak, aby odpovídaly mezím přípustného proudu statoru I_n a proudu rotoru I_b , které jsou určeny dovoleným oteplením statorového a rotorového vinutí.

Z diagramu na obr. 2.33 je možné určit například maximální hodnotu jalového zatížení alternátoru v poměrné hodnotě. Všechny hodnoty značené malými písmeny jsou v poměrných jednotkách.

Měřítka napětí :

$$k_u = \frac{i_n \cdot x_d}{\overline{OA}} = \frac{2}{\overline{OA}} \quad \text{pro : } \begin{matrix} i_n = 1 \\ x_d = 2 \end{matrix}$$

Měřítka výkonu : $k_s = \frac{S}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OA}} \quad \text{pro : } S = 1$

Měřítka proudu : $k_i = \frac{k_s}{k_u} = \frac{1}{2}$

Maximální jalový výkon alternátoru :

$$Q_{\max} = k_s \overline{OC'} \quad \text{kde } Q = \frac{Q}{Q_n} \quad (2.77)$$

Dále platí

$$e_v - u_g = k_u \overline{OC'} \quad (2.78)$$

Vztah (2.77) upravíme :

$$Q_{\max} = \frac{k_s}{k_u} (e_v - u_g) = k_i (e_v - u_g) \quad (2.79)$$

Podle fázorového diagramu :

$$Q_{\max} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(u_g + ix_d \sin \varphi)^2 + (ix_d \cos \varphi)^2} - u_g \right] \quad (2.80)$$

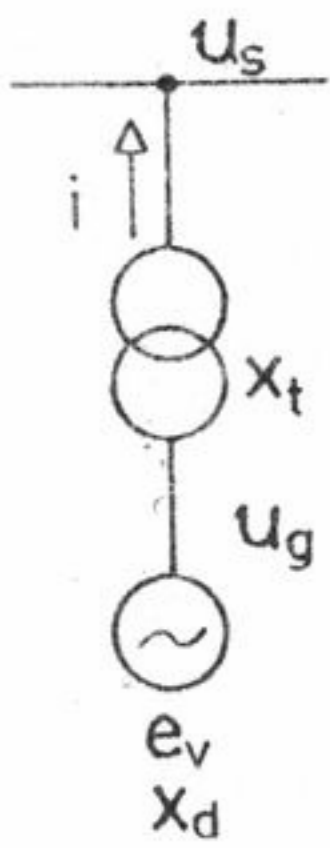
Pro jmenovité hodnoty :

$$\begin{aligned} u_g &= 1 \\ i &= 1 \\ \cos \varphi &= 0,8 \end{aligned}$$

je maximální jalový výkon alternátoru podle vztahu (2.80) :

$$Q_{\max} = 0,86$$

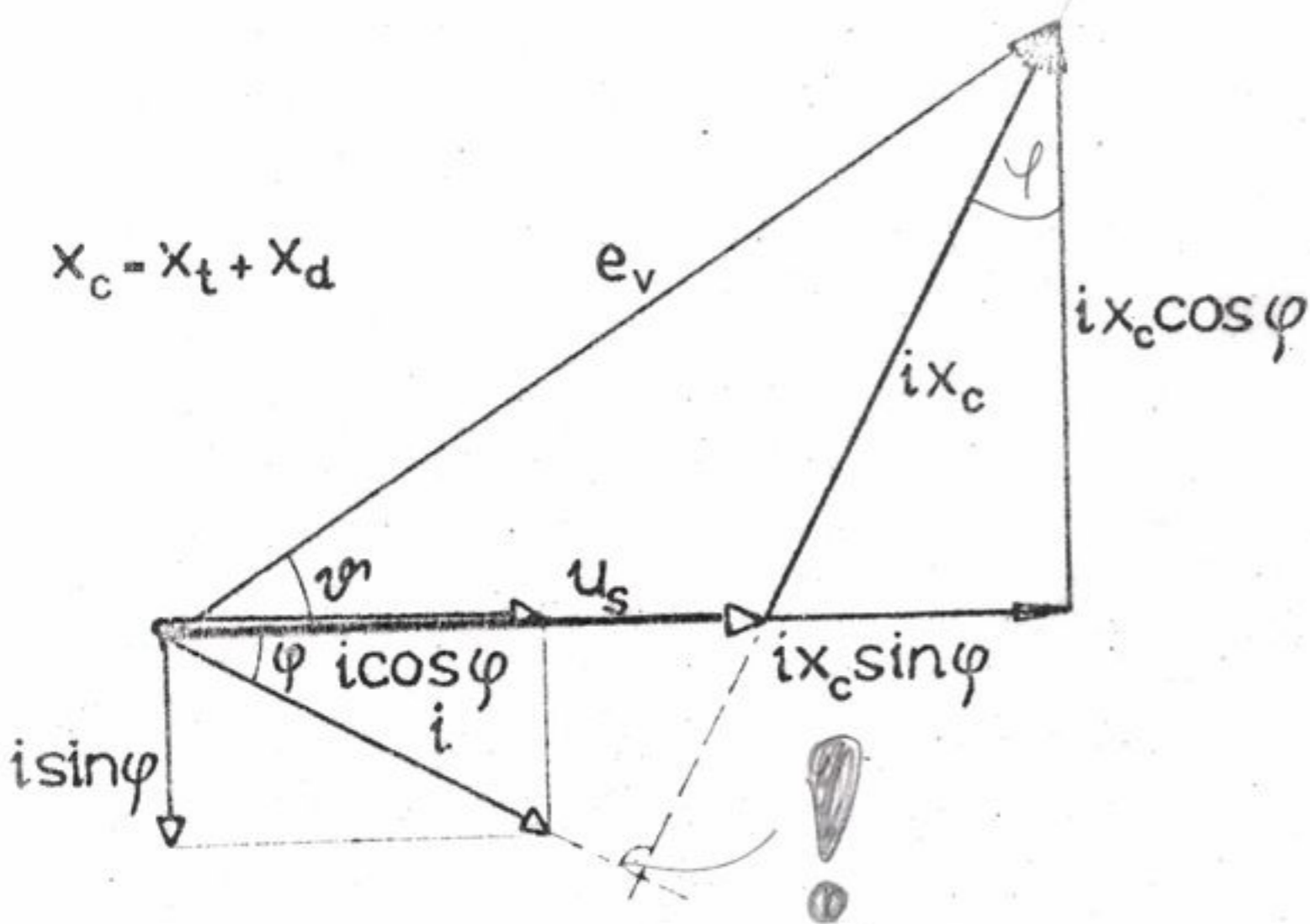
Při stanovení činného a jalového výkonu alternátoru uvažujeme alternátor pracující do elektrizační soustavy přes blokový transformátor. Všechny parametry jsou v poměrných hodnotách .



- u_s ... napětí sítě
- i ... proud alternátoru
- X_d ... synchronní reaktance alternátoru
- u_g ... napětí na svorkách alternátoru
- X_t ... reaktance transformátoru
- $X_c = X_g + X_t$... celková reaktance

Obr. 2.34. Jednopolové schéma : Alternátor-transformátor

Podle fázorového diagramu na obr. 2.35 platí :



kde :
 $i \cdot \cos \varphi \cdot X_c = e_v \sin \vartheta$

ϑ ... zátěžný úhel

$$e_v \sin \vartheta = i X_c \cos \varphi$$

Obr. 2.35. Fázorový diagram zatížení alternátoru

pro jednu fázi : $p = u_s \cdot i \cdot \cos \varphi$

$$p = \frac{e_v \cdot u_s}{X_c} \sin \vartheta$$

Pro trojfázovou soustavu :

$$p = 3 \cdot \frac{e_v \cdot u_s}{X_c} \sin \vartheta$$



(2.81)

(2.82)

Pro jalový výkon jedné fáze platí :

$$q = u_s \cdot i \cdot \sin \varphi$$

(2.83)

Podle fázorového diagramu platí :

$$i X_c \sin \varphi = e_v \cos \vartheta - u_s$$

$$i \sin \varphi = \frac{e_v \cos \vartheta - u_s}{X_c}$$

Po dosazení do vztahu (2.83) :

$$q = \frac{e_v \cdot u_s}{x_c} \cos \vartheta' - \frac{u_s^2}{x_c} \quad (2.84)$$

Nebo při využití vztahu (2.81), který upravíme :

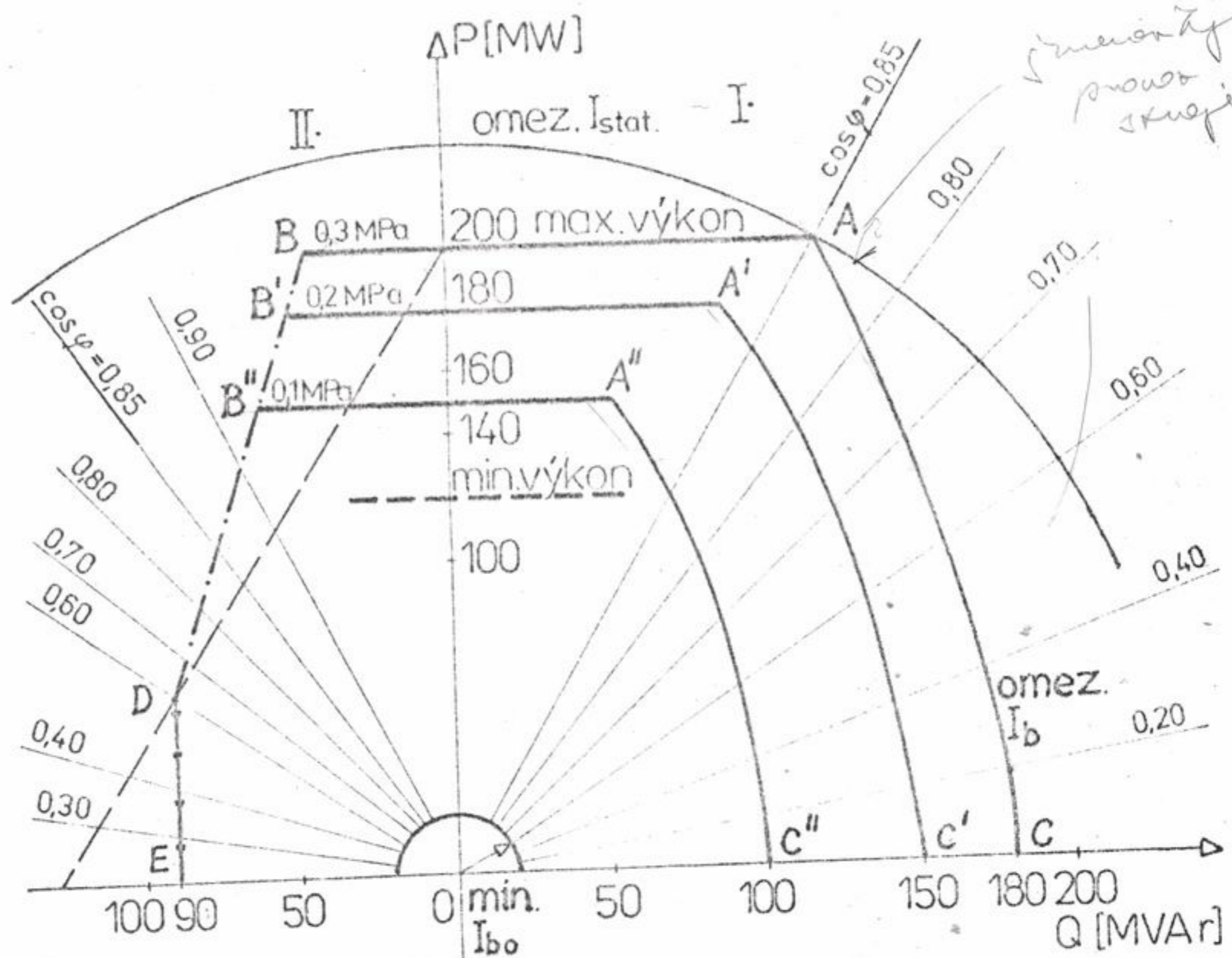
$$p \cdot \cotg \vartheta' = \frac{e_v u_s}{x_c} \cos \vartheta'$$

a dosadíme do vztahu (2.84) :

$$q = p \cdot \cotg \vartheta' - \frac{u_s^2}{x_c} \quad (2.85)$$

Pracovní P, Q diagramu alternátoru

Ve shodě s uvedenými předpoklady jsou křivky pro mezní provozní stavy alternátoru zakresleny v diagramu, kde na svislou osu vynášíme činné výkony P, na vodorovnou osu jalové výkony Q. Tento diagram je vhodnou pomůckou pro řízení provozu alternátoru .



— MEZ STAT. STABILITY PŘI PODBUZ. STAVU
 - - - OMEZENÍ OTEPLENÍM ČELNÍHO PROSTORU
 (PRO TLAK VODÍKU 0,3MPa ; u=0,9)

Obr. 2.36 Provozní P, Q diagramu alternátoru

Protože provoz alternátoru v motorickém chodu není dovolen, redukuje se oblast povolených stavů na I. a II. kvadrant. V prvním kvadrantu dodává alternátor činnou i jalovou energii

do sítě, pracuje v přebuzeném stavu. Ve druhém kvadrantu alternátor dodává činnou energii do sítě, jalovou energii ze sítě odebírá. Protože mají tyto dvě provozní oblasti odlišné podmínky pro stanovení limitních stavů alternátoru budou probrány odděleně.

Provoz alternátoru v přebuzeném stavu.

Omezení proudem statoru je ve shodě s předcházejícími diagramy vyjádřeno kružnicí opsanou ze středu souřadnic procházející bodem A, který reprezentuje jmenovitý provoz stroje. U alternátorů s vodním chlazením statorového vinutí neomezuje prakticky veličina statorového proudu v rozsahu uvažovaných činných a jalových výkonů provoz stroje, což je patrné i na P,Q diagramu. Budicí vinutí, které je chlazeno vodíkem má možnosti chlazení omezené a jsou závislé také na tlaku vodíku ve stroji. V P,Q diagramu je omezení budicím proudem reprezentováno částmi kružnic \overline{AC} ; $\overline{AC'}$; $\overline{A''C''}$ odpovídajících příslušnému tlaku vodíku. Hodnota budicího proudu je tak limitujícím faktorem pro dodávku jalové energie do sítě. Omezení dodávky činného výkonu z alternátoru do sítě je na horní mezi při jmenovitém tlaku vodíku dáno maximálním možným výkonem turbíny - čára \overline{AB} . Při snížení tlaku vodíku je nutno snížit jak činný tak i jalový výkon stroje, což odpovídá čarám $\overline{AB'}$ v prvním kvadrantu (resp. $\overline{A''B''}$).

Provoz alternátoru v podbuzeném stavu

Při podbuzeném stroji se nachází pracovní body alternátoru ve druhém kvadrantu. Mezní hranice pracovní oblasti alternátoru v podbuzeném stavu jsou určeny :

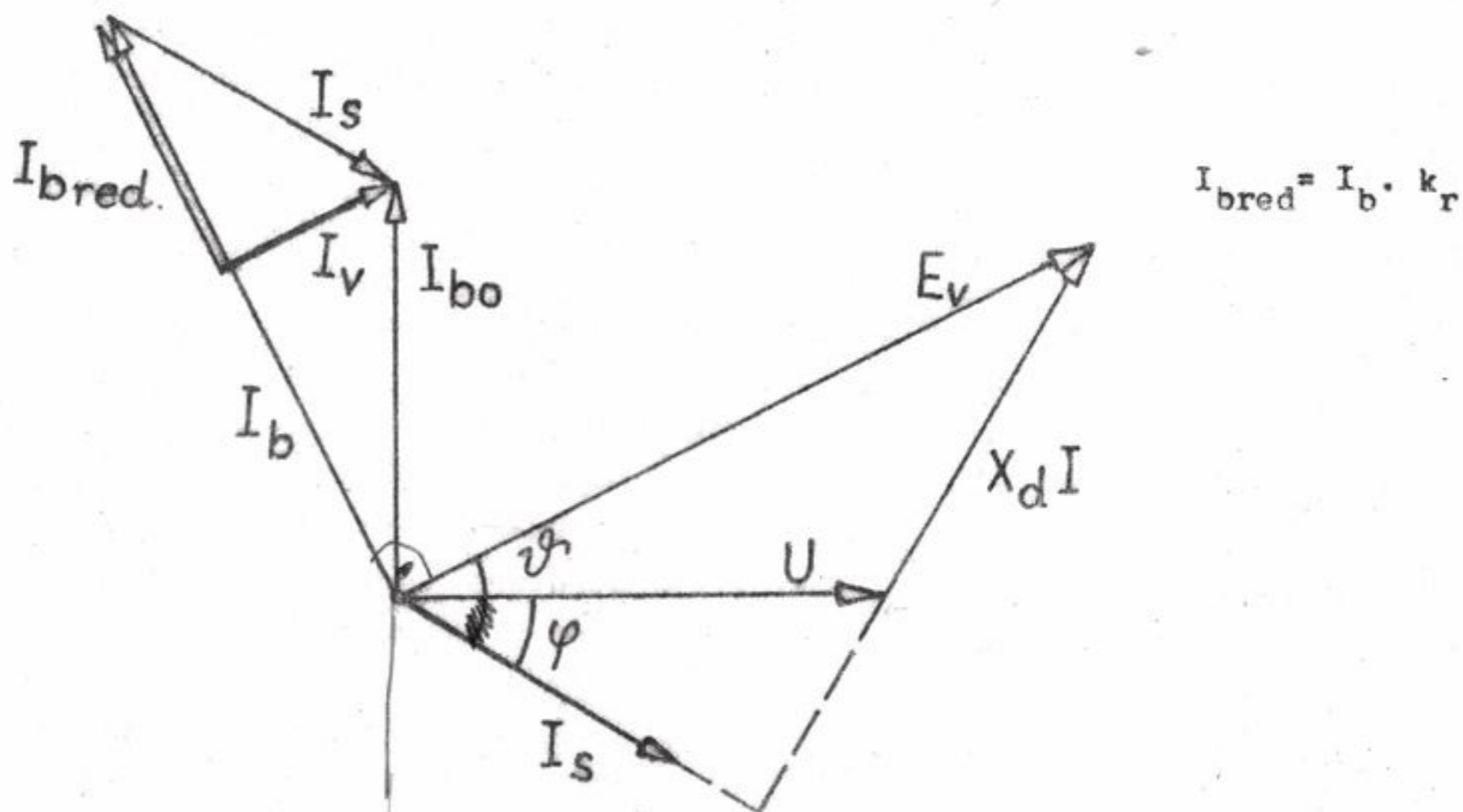
- oteplením konstrukčních částí čelního prostoru, - čára \overline{BD}
- statickou stabilitou alternátoru - čára \overline{DE} .

Oteplení konstrukčních částí čelního prostoru souvisí s vířivými proudy, které jsou vyvolány magnetickým tokem, vnikajícím z prostoru spojek statorového vinutí do čelní plochy magnetického obvodu statoru. Tento tok je u přebuzeného stroje poměrně malý a jím vyvolané ztráty nejsou z hlediska oteplení stroje důležité.

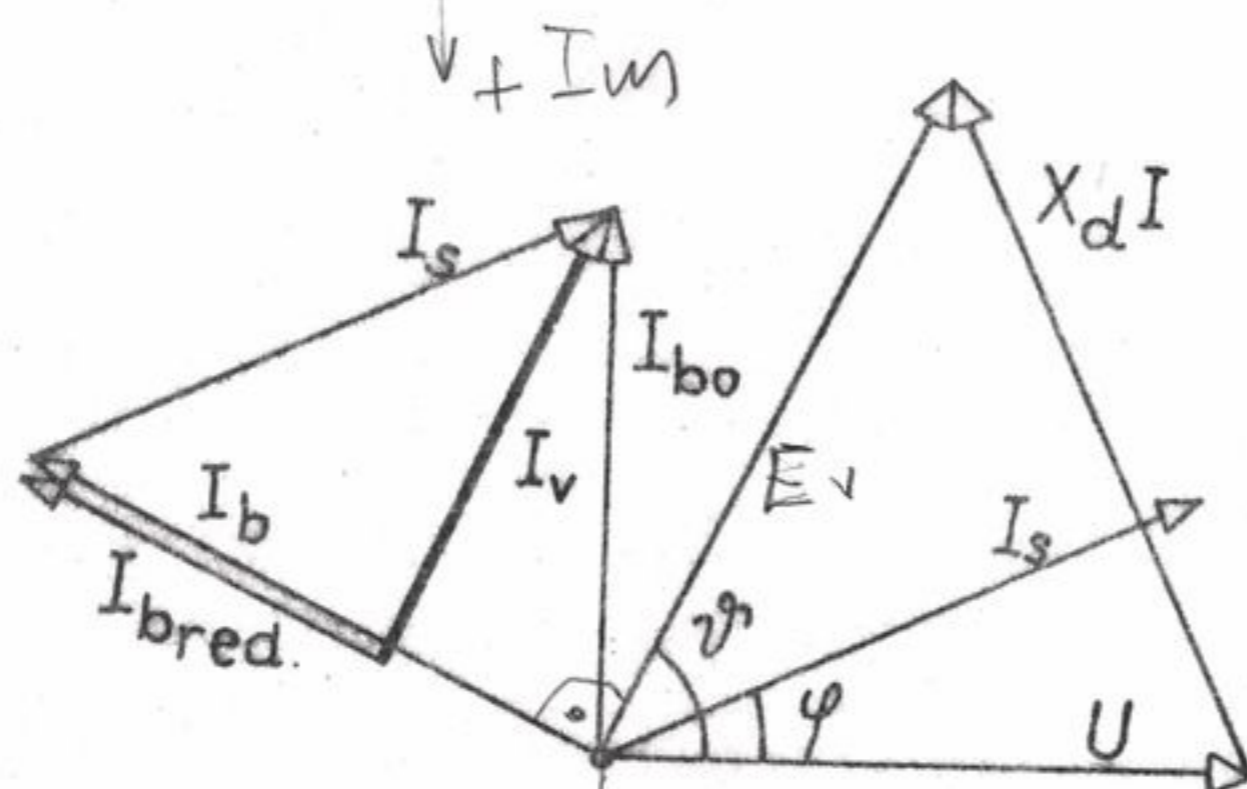
U podbuzeného stroje tento magnetický tok silně vzrůstá, takže oteplení, které je úměrné druhé mocnině magnetické indukce může dosáhnout nebezpečných hodnot. Největší koncentrace čelních magnetických polí a přídatných ztrát u turboalternátoru je v prostoru stínicí a stahovací desky a prvních paketů železa. Magnetický tok, procházející touto oblastí patří zčásti k aktivnímu toku stroje, neboť je spřažen s vinutím statoru i rotoru. Do tohoto prostoru vytlačuje také měděná stínicí deska část rozptylového toku čelních spojek statorového vinutí.

Magnetický tok v čelním prostoru je převážnou měrou určen magnetickým tokem statoru. Vliv magnetického toku rotoru se v čelním prostoru uplatní podstatně méně.

Pro přibližné posouzení velikosti magnetického toku v kritické oblasti čelního prostoru alternátoru s odlišením přebuzeného a podbuzeného stavu je uveden fázorový diagram ve kterém respektujeme zmenšení fázoru v proudu rotoru proti fázoru proudu statoru. Redukční činitel závisí na konstrukci stroje a pohybuje se od 0,3 do 0,5.



Obr. 2.37 a) Fázorový diagram alternátoru v přebuzeném stavu



Obr. 2.37 b) Fázorový diagram alternátoru v podbuzeném stavu

- U sverkové napětí stroje
- I_s proud statoru
- I_b budící proud
- I_{bred} .. redukováný budící proud
- I_{bo} ... budící proud naprázdno
- I_v výsledný proud

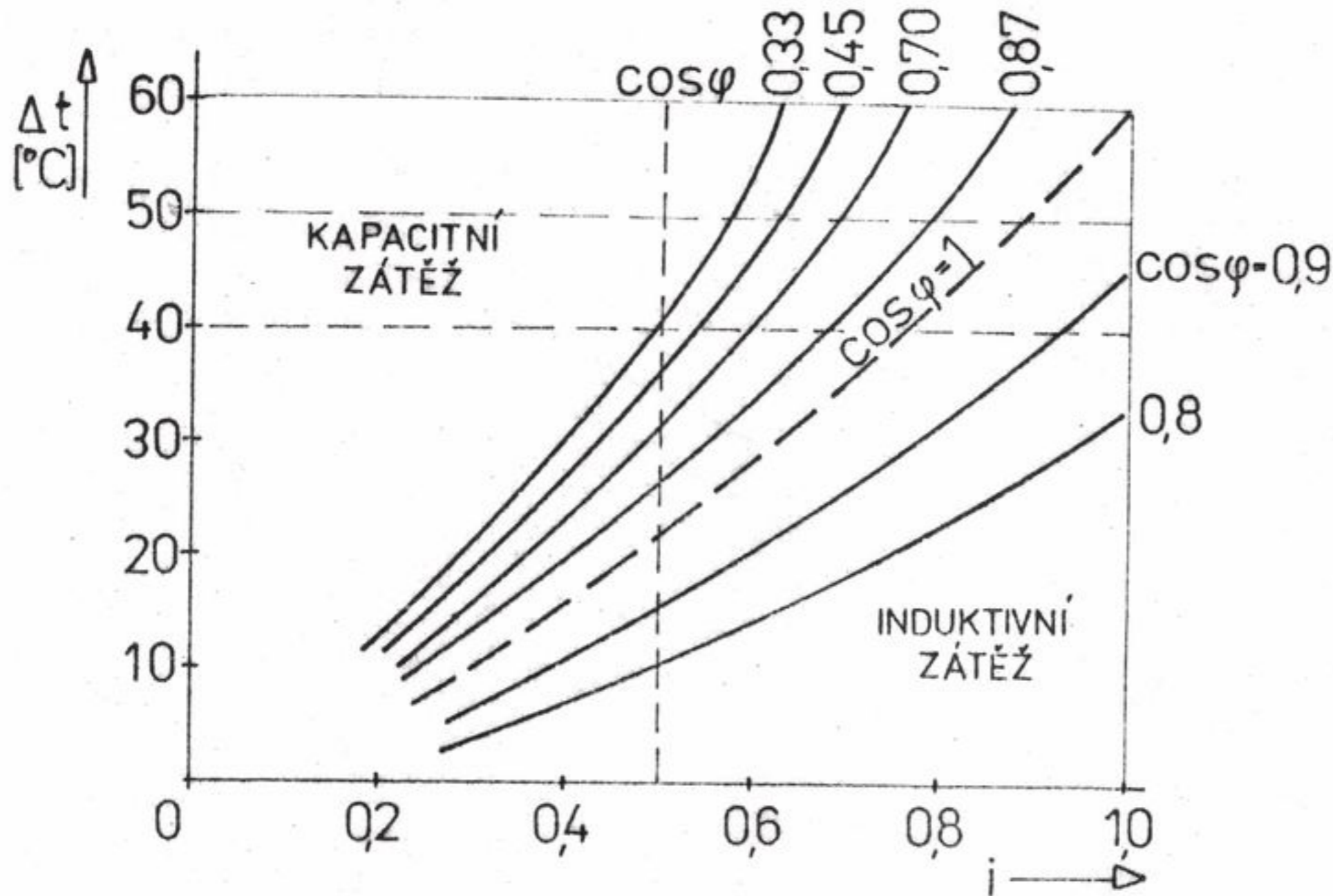
Výsledný fázor proudu I_v , který je dán vektorovým součtem fázoru proudu statoru a redukováného proudu rotoru je úměrný magnetické indukci ve vyšetřované oblasti čelního prostoru.

$$I_v = I_{bred} + I_s$$

Z fázorových diagramů je patrné, že výsledný fázor proudu I_v je při přebuzení stroje malý a naopak při zvýšeném podbuzování stroje vzrůstá.

Řada měření na turboalternátorech potvrdila platnost těchto předpokladů a prokázala, že oteplení u vnitřního průměru stahovací desky je limitujícím faktorem pro provoz stroje v podbuzeném stavu.

Aby bylo možno stanovit trvale dovolenou zátěž alternátoru při kapacitním zatížení byla nejprve změřena závislost oteplení stahovací desky statoru na proudu statoru. Jako příklad jsou uvedeny výsledky měření pro turboalternátor 235 MVA, které jsou na obr. 2.38.



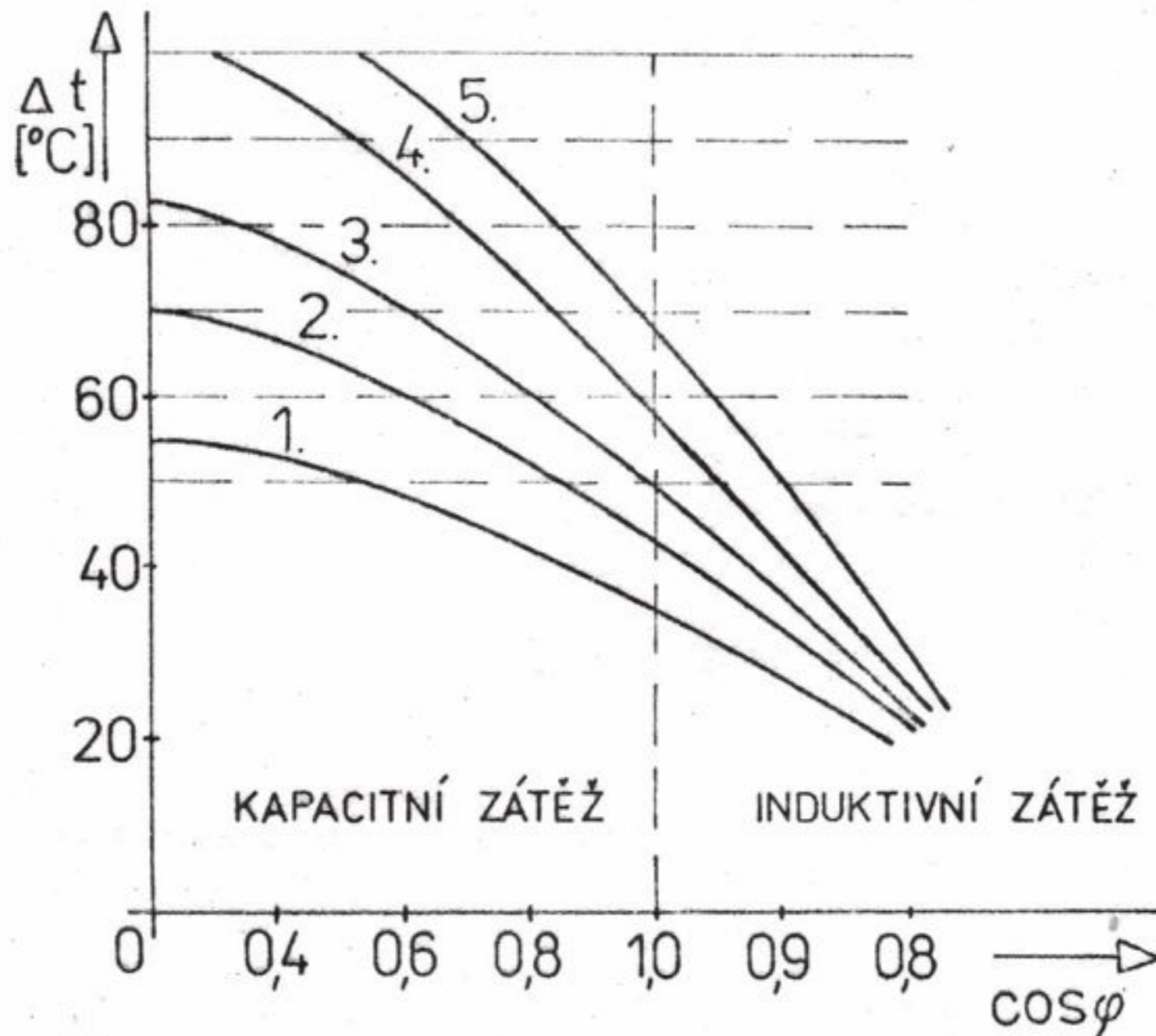
Obr. 2.28. Oteplení stahovací desky statoru

Výsledky měření potvrzují stanovené předpoklady, že zvýšení rozptylových toků v čelním prostoru roste se vzrůstajícím kapacitním zatížením.

Protože výsledky měření mají sloužit ke stanovení mezí v P,Q diagramu je na dalším obr. 2.39. uvedeno dovolené kapacitní zatížení alternátoru s ohledem na maximální přípustné oteplení stahovací desky statoru.

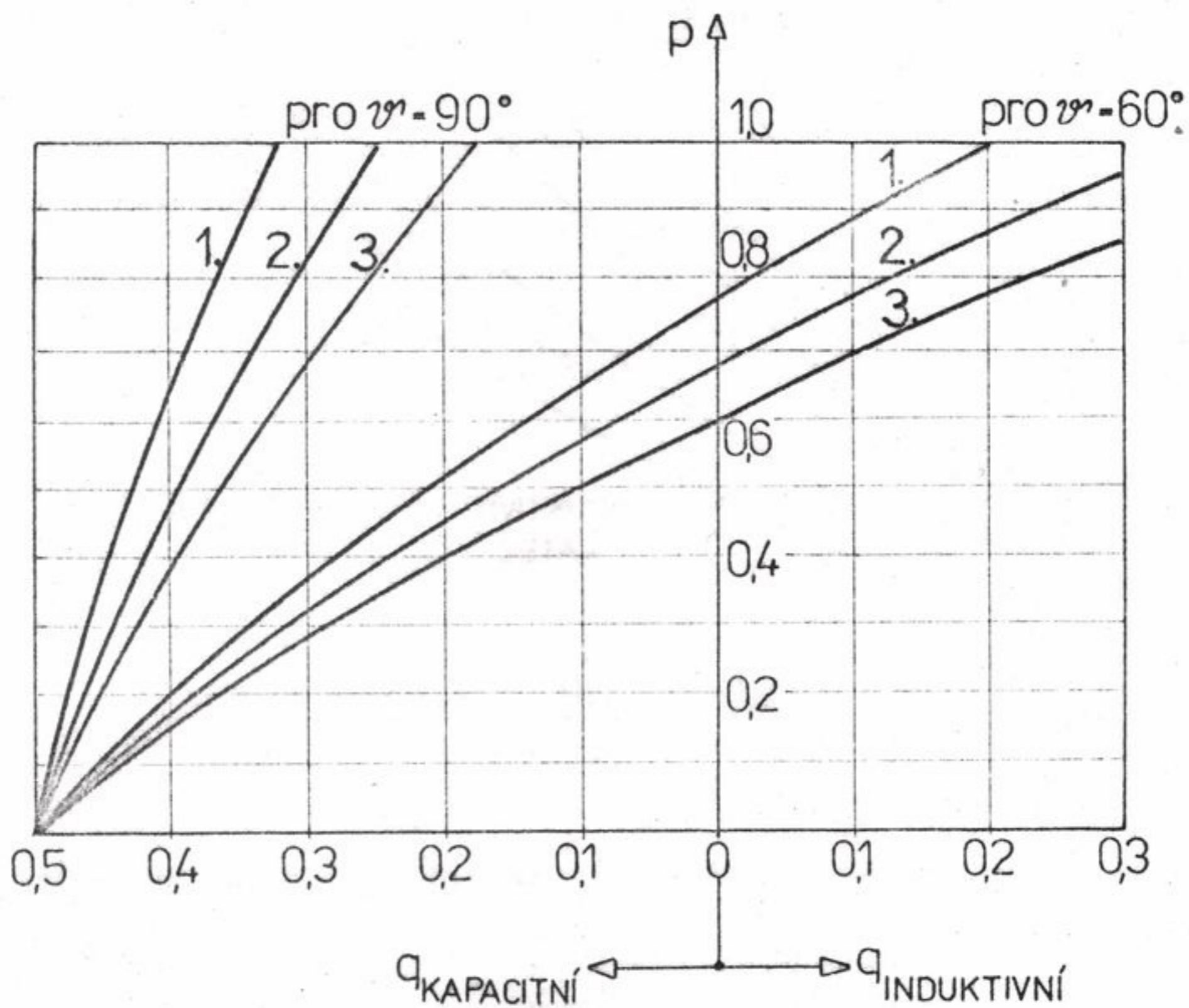
| číslo křivky | poměrný výkon s |
|--------------|-------------------|
| 1. | 0,404 |
| 2. | 0,455 |
| 3. | 0,510 |
| 4. | 0,540 |
| 5. | 0,583 |

$$s = \frac{S [\text{MVA}]}{S_n [\text{MVA}]}$$



Obr. 2.39. Dovelené kapacitní zatížení alternátoru.

Na dalším obr. 2.39. jsou zakresleny výsledné hodnoty dovolené kapacitní zátěže alternátoru pro zátěžný úhel na mezi statické stability $\psi = 90^\circ$ a pro různé vnější zátěže alternátoru. Orientace os je shodná s P,Q diagramem, takže je patrný vliv připojené sítě. Dále je třeba poznamenat, že dané křivky a jejich poloha jsou také závislé na napětí stroje a na tlaku vodíku ve stroji. Maximální oteplení stahovací desky se připouští v rozmezí $90 \pm 100^\circ\text{C}$.



$$p = \frac{P \text{ [MW]}}{P \text{ [MW]}}$$

$$q = \frac{Q \text{ [MVAr]}}{S \text{ [MVA]}}$$

Obr. 2.40. Dovolené kapacitní zatížení alternátoru (při proměnné vnější reaktanci)

Pro $u = 1,0$; $x_d = 2,0$

| Křivkač. | Vnější reaktance |
|----------|------------------|
| 1. | $x_v = 0,1$ |
| 2. | $x_v = 0,2$ |
| 3. | $x_v = 0,3$ |

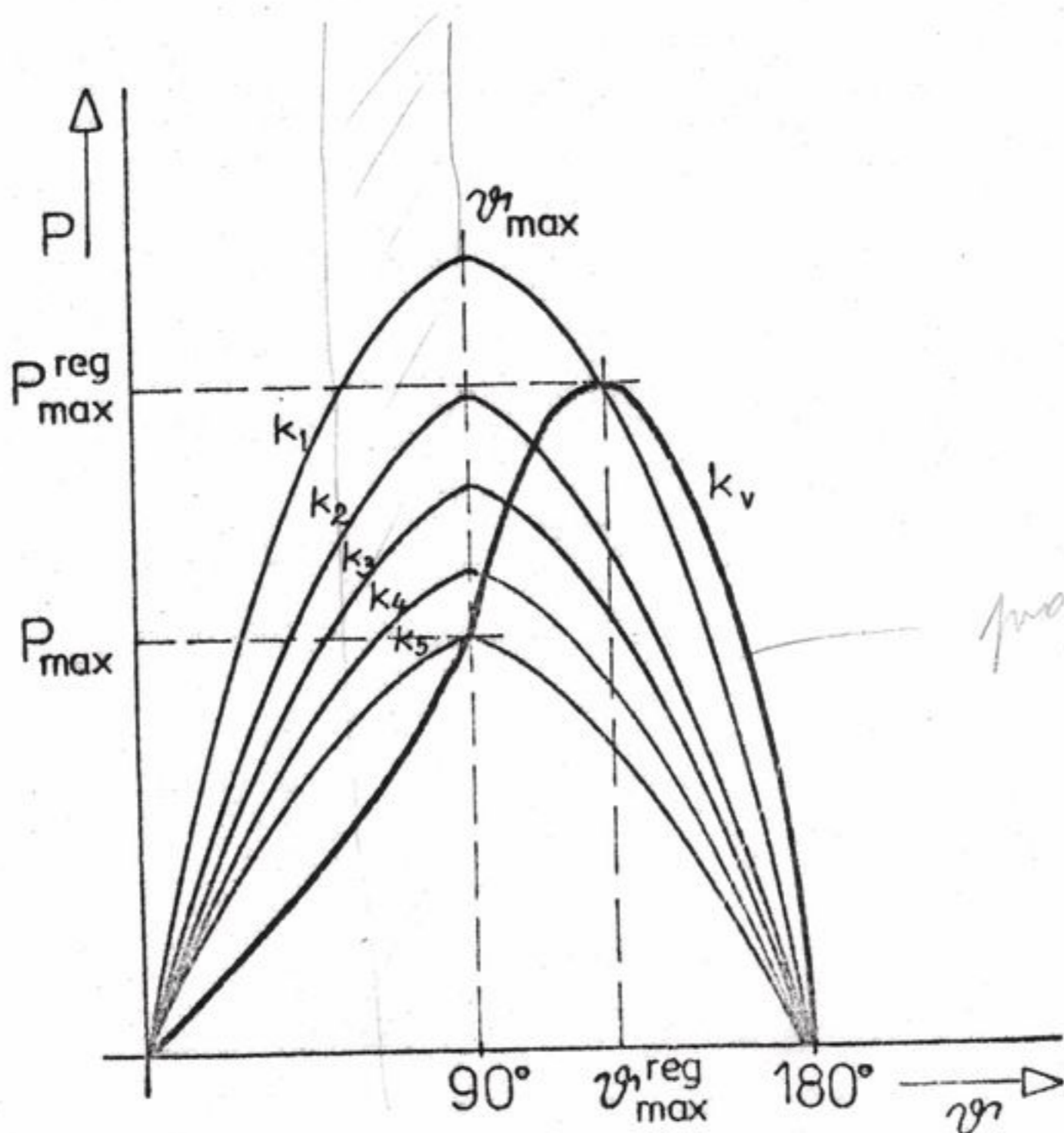
Statická stabilita alternátoru se posuzuje podle vztahu mezi činným výkonem a zátěžným úhlem alternátoru :

$$p_g = 3 \cdot \frac{u_s \cdot e_v}{x_d + x_v} \cdot \sin \psi$$

(2.86)

kde :

- u_s ... napětí sítě
- e_v ... vnitřní napětí alternátoru
- x_d ... synchronní reaktance alternátoru
- x_v ... vnější reaktance
- p_g ... činný výkon alternátoru



$k_1 \div k_5$... vnitřní charakteristiky stroje

k_v ... vnější charakteristika stroje

pro regulaci u_s orkeny = konst.

Obr. 2.41. Závislost činného výkonu alternátoru na zátěžném úhlu

Mez statické stability je dána extrémem funkce $\sin \psi$, neboli pro:

$$\frac{dp}{d\psi} = 0 \quad \text{je} \quad p_{g \max} = \frac{u_s \cdot e_v}{x_d + x_v}$$

pro $\psi = 90^\circ$

U alternátorů s ručním ovládním buzení je mezní provozní zátěžný úhel dovolen 60° . Při automatické regulaci buzení pomocí moderních bezkontaktních regulátorů lze dosáhnout oblasti tzv. umělé stability se zátěžnými úhly nad 120° . S ohledem na bezpečnost provozu lze s dostatečnou rezervou provozovat turboalternátor při celkovém zátěžném úhlu $\psi = 90^\circ$. Na obr. 2.41. je nakreslena síť vnitřních charakteristik stroje a výsledná vnější charakteristika.

Rychlá regulace napětí alternátoru dovoluje rychlý přechod pracovního bodu alternátoru z jedné charakteristiky na druhou (odpovídající změně budícího proudu). Tím dosahujeme kladnou derivaci činného výkonu podle zátěžného úhlu:

$$\frac{dp}{d\psi} > 0, \text{ která je podmínkou stabilního chodu alternátoru.}$$

Nesymetrické zatížení alternátoru

*Každá dvě něco
okypení rotoři*

Při normálním provozu jsou proudy a napětí alternátoru souměrné. Poruchy nebo chybné funkce spínacích přístrojů v elektrizační soustavě se mohou projevit u alternátoru jako porušení symetrie proudu a napětí. Jsou to zejména jedнопólové a dvoupólové zkraty na straně vvn nebo přerušeni jedné fáze při chybné funkci spínače, které způsobí výraznou nesouměrnou zátěž alternátoru.

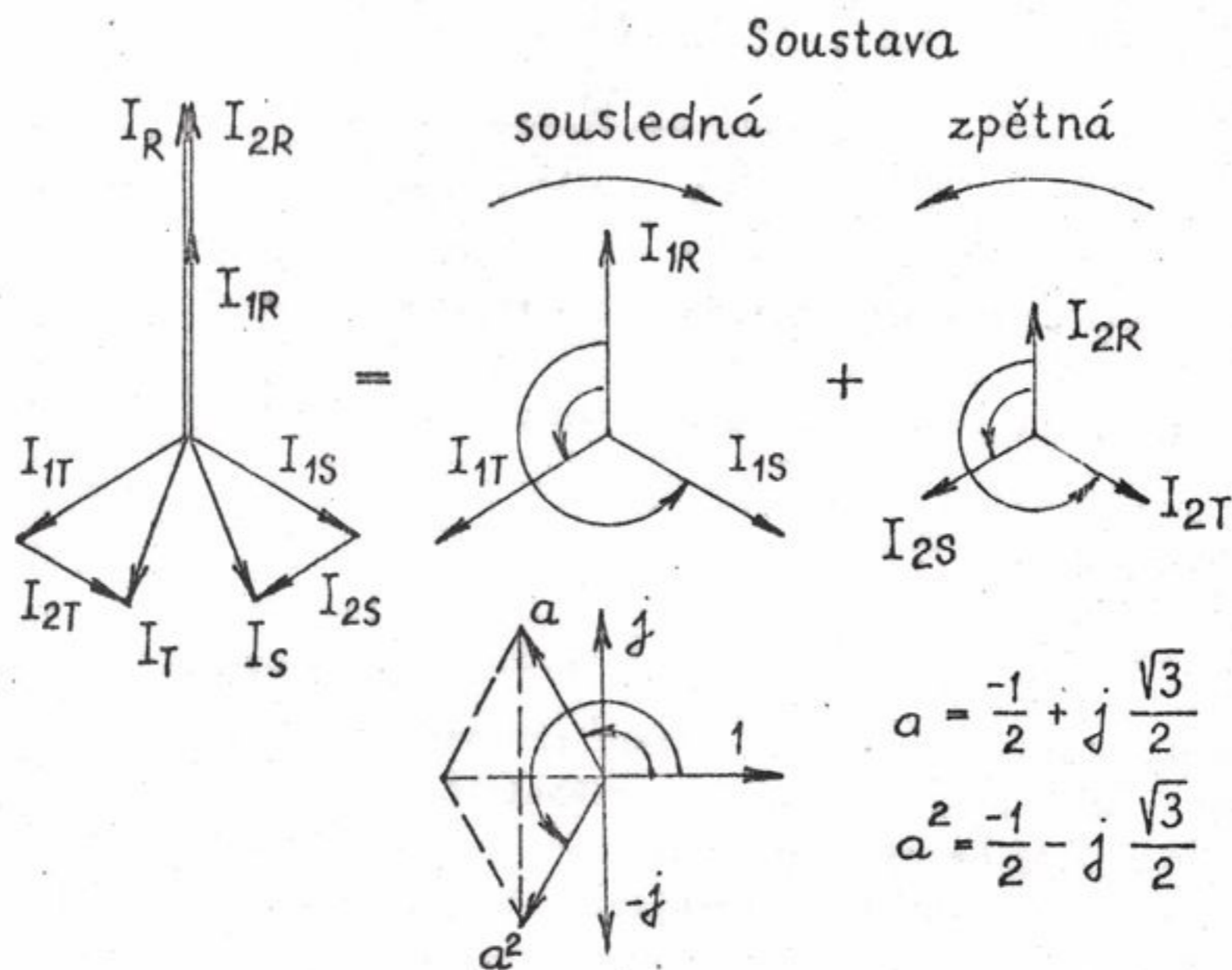
Při nesouměrném zatížení alternátoru dochází k porušení symetrie statorových proudů I_R, I_S, I_T . Nesouměrná soustava proudů se rozkládá na souměrné soustavy proudů sousledných a zpětných. Nulová složka se u alternátorů neuplatní, protože uzel je neúčinně uzemněn :

$$\left. \begin{aligned} I_R &= I_{1R} + I_{2R} = I_1 + I_2 \\ I_S &= I_{1S} + I_{2S} = a^2 I_1 + a I_2 \\ I_T &= I_{1T} + I_{2T} = a I_1 + a^2 I_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.87)$$

kde :

- I_1 ... proudy sousledné soustavy
- I_2 ... proudy zpětné soustavy

Fázorové diagramy rozkladu nesouměrné proudové soustavy na souslednou a zpětnou soustavu jsou na obr. 2.42. podle vztahů (2.87)



Obr. 2.42. Nesymetrické zatížení alternátoru

Zpětná soustava proudů vytváří ve statoru točivé magnetické pole, které se otáčí synchronní rychlostí obráceným směrem proti otáčení rotoru stroje. Vzájemná rychlost rotoru a otáčení magnetického pole statoru vytvořeného zpětnou soustavou proudů je tedy dvojnásobkem synchronní rychlosti. V důsledku toho se indukují v masivních částech tlumiče a rotoru vířivé proudy o frekvenci 100 Hz, které způsobují přídavné oteplení rotoru. Protože tepelné využití rotoru je vyšší s rostoucím typovým výkonem strojů, je nutné zejména u velkých al-

ternátorů sledovat teplo akumulované v rotoru od přídatných ztrát způsobených vířivými proudy.

Alternátory jsou navrženy pro trvalé nesymetrické zatížení 8% proudu zpětné složky vzhledem k proudu jmenovitému. ($I_n = 100\%$.) Pro různé alternátory jsou výrobcem udávány hodnoty tepelné rezervy a oteplovací charakteristiky daného stroje, podle které se stanoví přípustná doba trvání určité nesymetrie.

Celková akumulovaná energie bude úměrná integrálu :

$$k(T) = \int_0^T i_2^2(t) dt \quad (2.88)$$

kde :

$k(T)$... poměrná hodnota tepelné energie akumulované v rotoru v časovém intervalu $\langle 0; T \rangle$

$$i_2(t) = \frac{I_2(t)}{I_n} \quad (2.89)$$

$i_2(t)$... poměrná hodnota proudu zpětné složky

Poměrná efektivní hodnota proudu zpětné složky v intervalu $\langle 0; T \rangle$

$$i_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_2^2(t) dt} \quad (2.90)$$

Po úpravě :

$$T i_2^2 = \int_0^T i_2^2(t) dt = k(T) \quad (2.91)$$

Je zřejmé, že hodnota $k(T)$ je funkcí času. Čas T je doba, po kterou je stroj nesymetricky zatížen. Pro každý alternátor je výrobcem udávána charakteristická hodnota K_{max} [sec] která nesmí být překročena [podle rovnice (2.92)]. Pro turboalternátory Škoda platí hodnoty uvedené v tab. 5.

| P [MW] | K_{max} [sec] |
|--------|-----------------|
| 50 | 20 |
| 110 | 10 |
| 200 | 7,5 |
| 500 | 5 |

$$K_{max} \geq k(T) = T i_2^2 \quad (2.92)$$

Doba nesymetrického provozu pak nesmí překročit čas T při dané hodnotě i_2 .

$$T \leq \frac{K_{max}}{i_2^2} \quad (2.93)$$

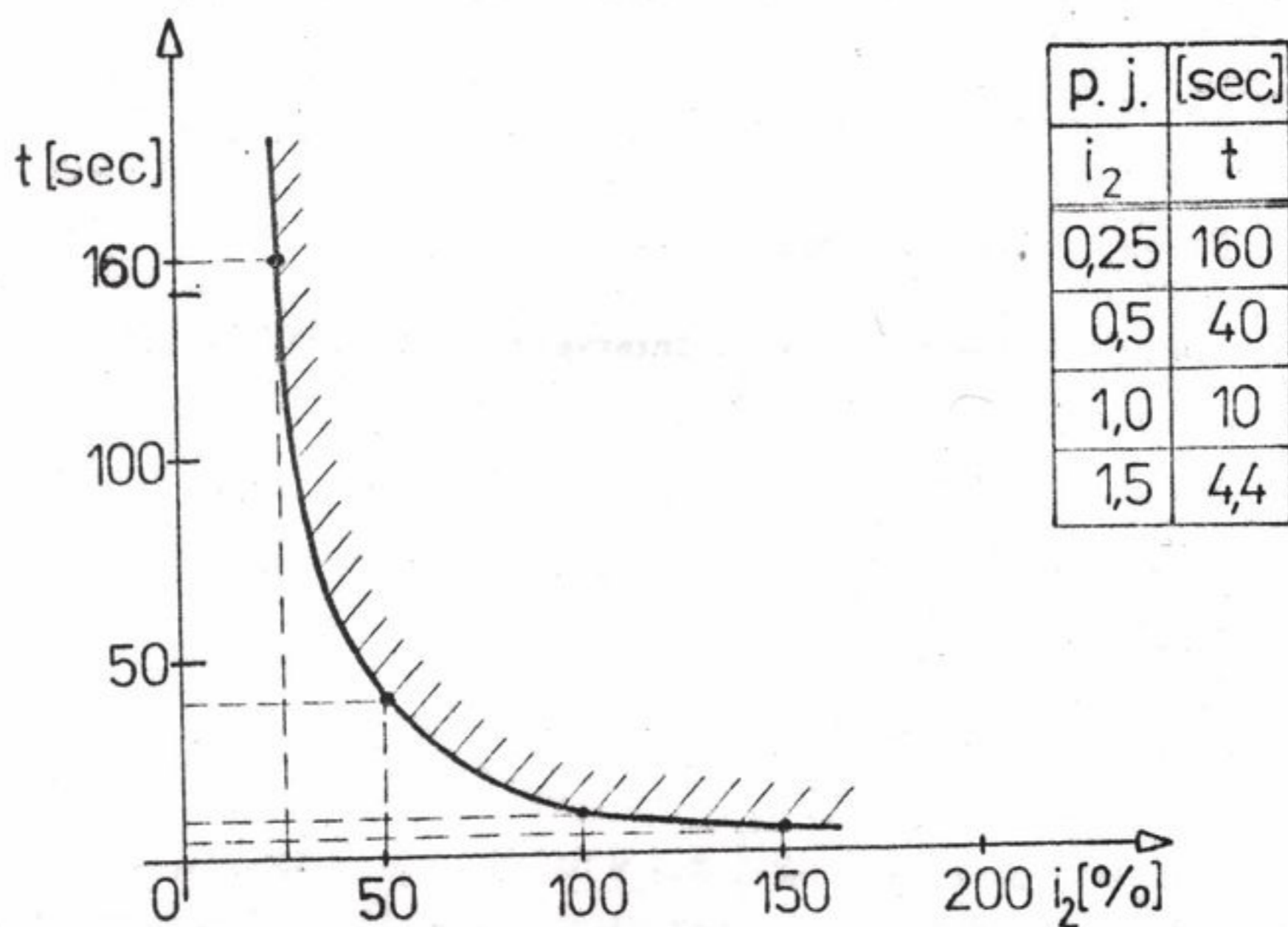
Tab. 5

Příklad nastavení ochrany při nesymetrickém zatížení pro turboalternátor 110 MW; $K_{max}=10$

Dovolenou hranici zatěžování turboalternátoru nesymetrickým zatížením určíme podle vztahu (2.93) pro různé hodnoty zpětné složky proudu i_2 . Například pro hodnotu $i_2=0,5$

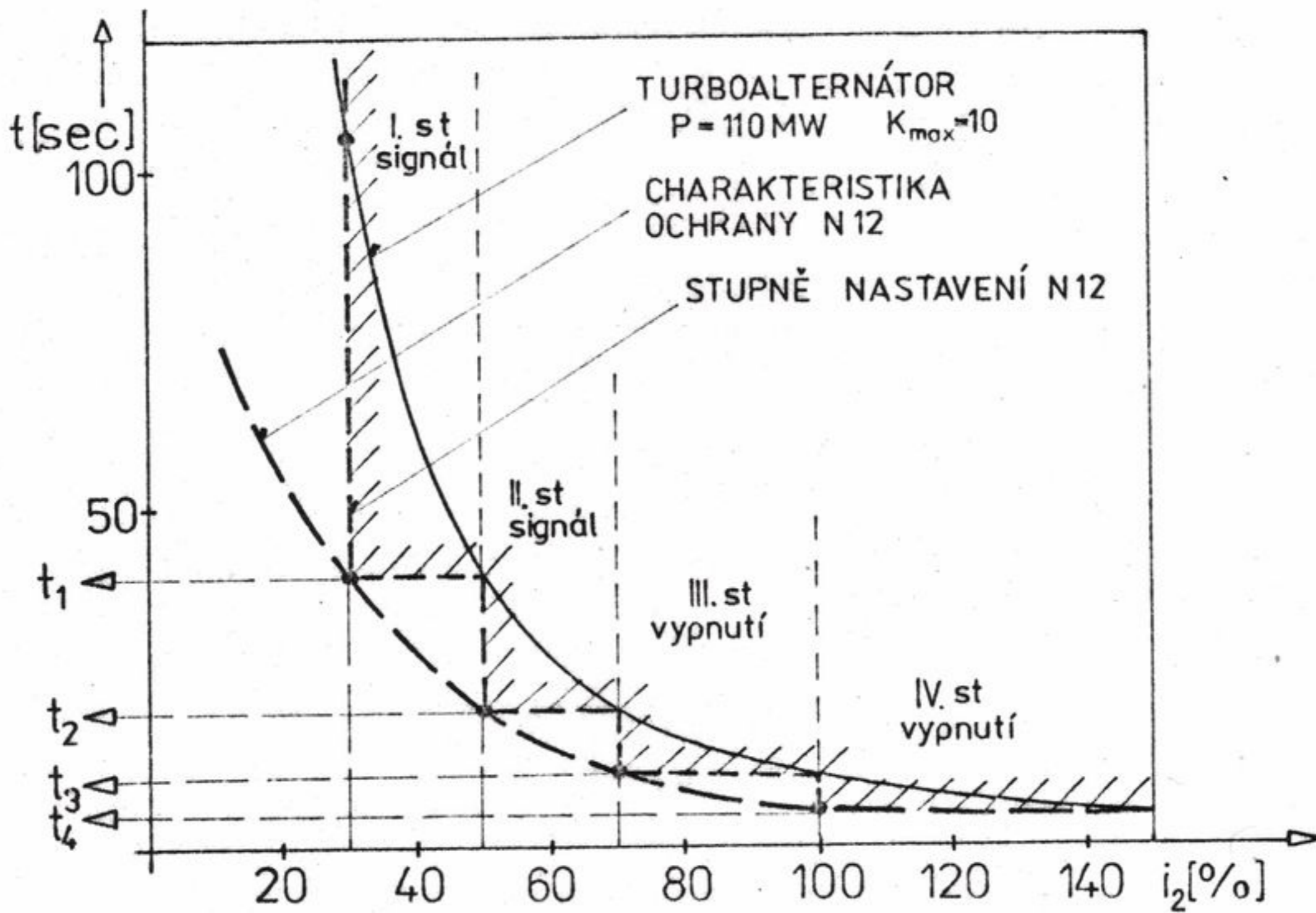
$$t_{0,5} = \frac{10}{0,5^2} = 40 \text{ sec}$$

Výsledné hodnoty dovoleného zatěžování alternátoru jsou na obr. 2.43 včetně tabulky s vypočítanými hodnotami.



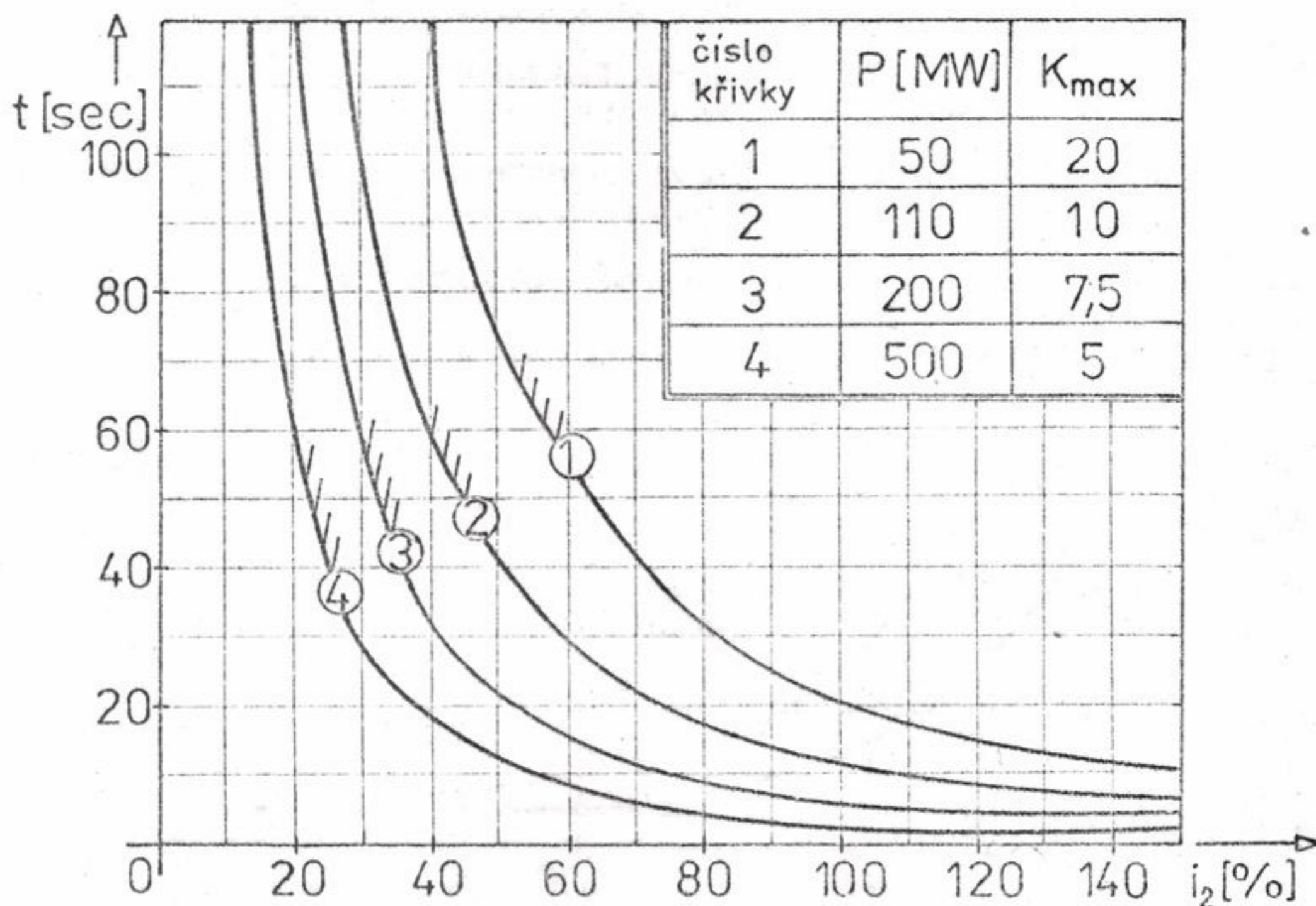
Obr. 2.43. Dovolené nesymetrické zatížení turboalternátoru 110 MW.

Nastavení ochrany při nesymetrickém zatížení je naznačeno na obr. 2.44, kde je čárkovanou čarou nakreslena spojitá charakteristika ochrany, plnou čarou stupňovitá charakteristika ochrany (například N12). Charakteristika ochrany musí ležet pod křivkou určující dovolené zatížení alternátoru.



Obr. 2.44. Nastavení ochrany při nesymetrickém zatížení alternátoru

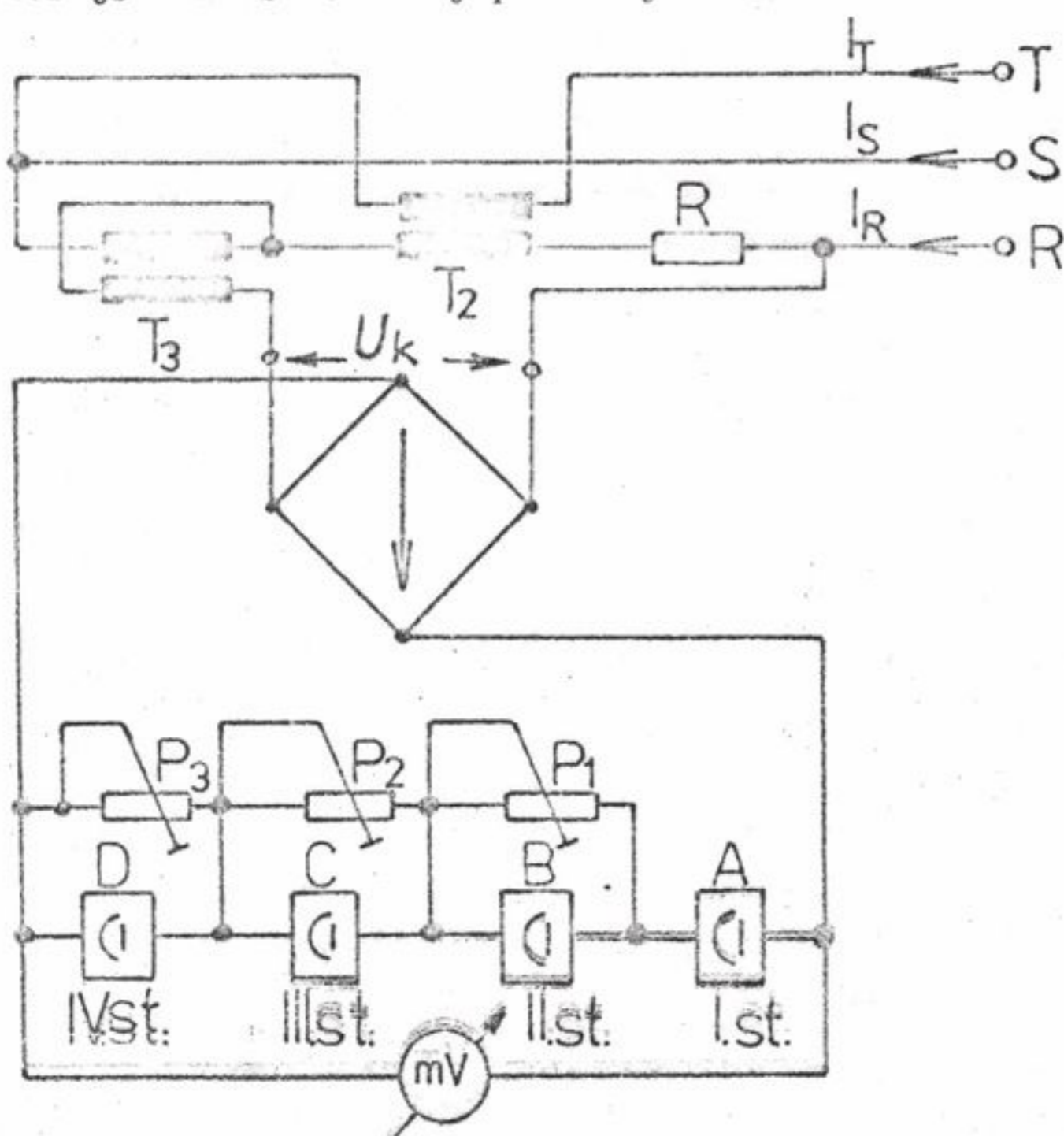
Stejným způsobem postupujeme při návrhu funkce ochrany při nesymetrickém zatížení u alternátorů jiných jmenovitých výkonů s příslušným koeficientem dovolené nesymetrické zátěže K_{\max} . Na obr. 2.45 jsou charakteristiky turboalternátorů určující meze přípustného nesymetrického zatížení. Z těchto závislostí je patrné, že u strojů velkých jednotkových výkonů je přípustná poměrná hodnota tepelné energie akumulované do rotoru menší než u strojů menším jmenovitým výkonem. Tato skutečnost je dána vyšším využitím magnetického obvodu u strojů velkých výkonů.



Obr. 2.45. Dovolená nesouměrná zatížení turboalternátorů

Pro každý stroj je tedy nutné, aby se charakteristika ochrany těsně přimykala tepelné charakteristice stroje pro přídavné oteplení. Současně vyráběná a používaná ochrana N 12 je nastavitelná ve čtyřech stupních velikosti zpětného proudu. První dva stupně ochrany dávají signalizační impuls, druhé dva stupně nařízené na velkou nesymetrickou zátěž, dávají povel k odpojení alternátoru od sítě.

Zvláštností této ochrany je, že je připojena na měřicí transformátory proudu pro měření, které mají vyšší třídu přesnosti. Zde nevyžadujeme velké naproudé číslo, neboť ochrana sleduje rovnoměrnost zatížení při jmenovitém zatížení alternátoru. Při poruchách mimo alternátor je činnost ochrany při nesymetrickém zatížení záložní.



Obr.2.46. Zapojení ochrany při nesymetrickém zatížení alternátoru

Zásadní zapojení ochrany při nesymetrickém zatížení je nakresleno na obr. ^{2.46} Napětí U_k na výstupu filtru zpětné složky je úměrné velikosti nesymetrie zatížení alternátoru.

Podle obr. 2.46. označíme :

- T_2, T_3 ... pomocné transformátory ochrany,
 P_1, P_2, P_3 potenciometry pro nastavení citlivosti jednotlivých stupňů,
 A, B, C, D .. měřicí relé (systém depréz)
 mV ... měřicí přístroj umístěný na panelu dozorny pro sledování velikosti nesymetrické zátěže
 R ... ohmický odpor
 L_2 ... vlastní indukčnost vinutí transformátoru T_2 ve fázi R
 L_a ... rozptylová indukčnost vinutí transformátoru T_2 ve fázi R
 $i_2 = \frac{I_2}{I_n}$..poměrná efektivní hodnota zpětné složky proudu
 M_2 ... vzájemná indukčnost transformátoru T_2
 M_3 ... vzájemná indukčnost transformátoru T_3

Napětí na filtru zpětné složky proudu :

$$\begin{aligned}
 U_k &= (R + j\omega L_2 - j\omega M_3) I_R + j\omega M_2 I_T = \\
 &= (R + j\omega L_2 - j\omega M_3) \cdot (I_1 + I_2) + j\omega M_2 \cdot (a I_1 + a^2 I_2) = \\
 &= R I_1 + j\omega L_2 I_1 - j\omega M_3 I_1 + R I_2 + j\omega L_2 I_2 - j\omega M_3 I_2 + j\omega M_2 I_1 a + j\omega M_2 I_2 a^2 = \\
 &= (R - \omega \frac{\sqrt{3}}{2} M_2) I_1 + j\omega (L_2 - M_3 - \frac{1}{2} M_2) I_1 + \\
 &\quad + (R + \omega \frac{\sqrt{3}}{2} M_2) I_2 + j\omega (L_2 - M_3 - \frac{1}{2} M_2) I_2 \quad (2.94)
 \end{aligned}$$

Pro indikaci zpětné složky proudu i_2 bude filtr naladěn při splnění těchto podmínek :

$$\left. \begin{aligned}
 M_2 &= p (L_2 - L_a) \quad ; \quad M_3 = L_a \\
 p &= 2 \quad ; \quad R = \frac{\sqrt{3}}{2} \omega M_2
 \end{aligned} \right\} \quad (2.95)$$

Po dosazení do vztahu (2.94) :

$$\begin{aligned}
 U_k &= (R + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega M_2) I_2 + j\omega [(L_2 - M_3) - \frac{1}{2} p (L_2 - L_a)] \cdot (I_1 + I_2) = \\
 &= 2R I_2 + j\omega (L_2 - M_3 - L_2 + L_a) \cdot (I_1 + I_2) = \\
 &= 2R I_2 = 2R I_n i_2 \quad (2.96)
 \end{aligned}$$

Napětí na výstupu filtru je po usměrnění měřeno ve čtyřech nastavitelných stupních a podle velikosti nesymetrie je spuštěn příslušný nastavitelný časový člen. Po uplynutí nařizené doby, po kterou trvá nesouměrná zátěž dává ochrana signalizační (obvykle I. a II. stupeň), nebo vypínací (III. a IV. stupeň) impuls.

Asynchronní chod alternátoru

U alternátoru může nastat porucha v budícím obvodu, která způsobí částečnou nebo úplnou ztrátu buzení. Při nedostatečné hodnotě budícího proudu nebo při jeho úplném přerušení dochází obvykle k vypadnutí stroje ze synchronního chodu. Při částečné ztrátě buzení, kdy hlavní budící obvod je uzavřen, vznikají při asynchronním chodu alternátoru mohutné proudové a momentové rázy, které jsou s ohledem na provoz stroje přípustné jen na velmi krátkou dobu několika prokluzů. Úplná ztráta buzení alternátoru může v elektrárenském provozu nastat v těchto případech :

- vinutí rotoru je spojeno nakrátko,
- vinutí rotoru je spojeno nakrátko přes odbuzovač,
- vinutí rotoru je spojeno přes usměrňovač,
- vinutí rotoru je rozpojeno.

Při úplné ztrátě buzení, kdy stroj pracuje jako asynchronní alternátor, lze za určitých okolností, zejména při sníženém činném výkonu dodávaném do sítě připustit krátkodobě asynchronní chod. To dává provozovateli možnost odstranit příčinu závady nebo přejít na rezervní zdroj buzení a po znovunabuzení přejít po přifázování alternátoru do normálního provozního stavu, synchronního chodu. Dojde-li ke ztrátě buzení u zatíženého alternátoru, pracujícího synchronně se sítí, začne stroj při přechodu na asynchronní provoz způsobený ztrátou buzení odebírat ze sítě značný jalový proud potřebný k zachování svého magnetického toku. Například u turboalternátoru 235 MVA je v takovém případě velikost jalového výkonu odebíraného ze sítě 150 až 190 MVAR. Na přípojnicích rozvodny, do které je vyveden výkon elektrárny dochází k poklesu napětí, který je způsoben ztrátou buzení alternátoru a odběrem jalového výkonu ze sítě. U systému 400 kV je jen 1% až 2% U_n , u sítí 110 kV je pokles napětí větší. Pokles napětí není pro asynchronní provoz jednoho alternátoru omezujícím faktorem, neboť deficit jalových výkonů je vyrovnáván ostatními alternátory elektrizační soustavy vybavenými vesměs automatickými regulátory napětí a budícími soustavami s dostatečnou výkonovou rezervou. Větší měrou se projeví pokles napětí na blokové rozvodně vlastní spotřeby asynchronně pracujícího alternátoru; reálný provoz vlastní spotřeby je třeba zajistit převedením napájení na rezervní zdroj.

V důsledku poklesu synchronizačního momentu se začne rotor alternátoru urychlovat. Skluzové proudy se uzavírají elektricky vodivými uzavřenými obvody rotoru a umožňují tak přenos energie z rotoru na stator. Velikost asynchronního momentu je podle (2.46) :

$$m_{as} = \frac{U_{st}^2}{2} \left[\left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \frac{s T_d'}{1 + (s T_d')^2} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \cdot \frac{s T_d''}{1 + (s T_d'')^2} + \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \cdot \frac{s T_q''}{1 + (s T_q'')^2} \right]$$

Celkový asynchronní moment alternátoru m_{as} si rozdělíme na tři složky :

$$m_{as} = m_d' + m_d'' + m_q''$$

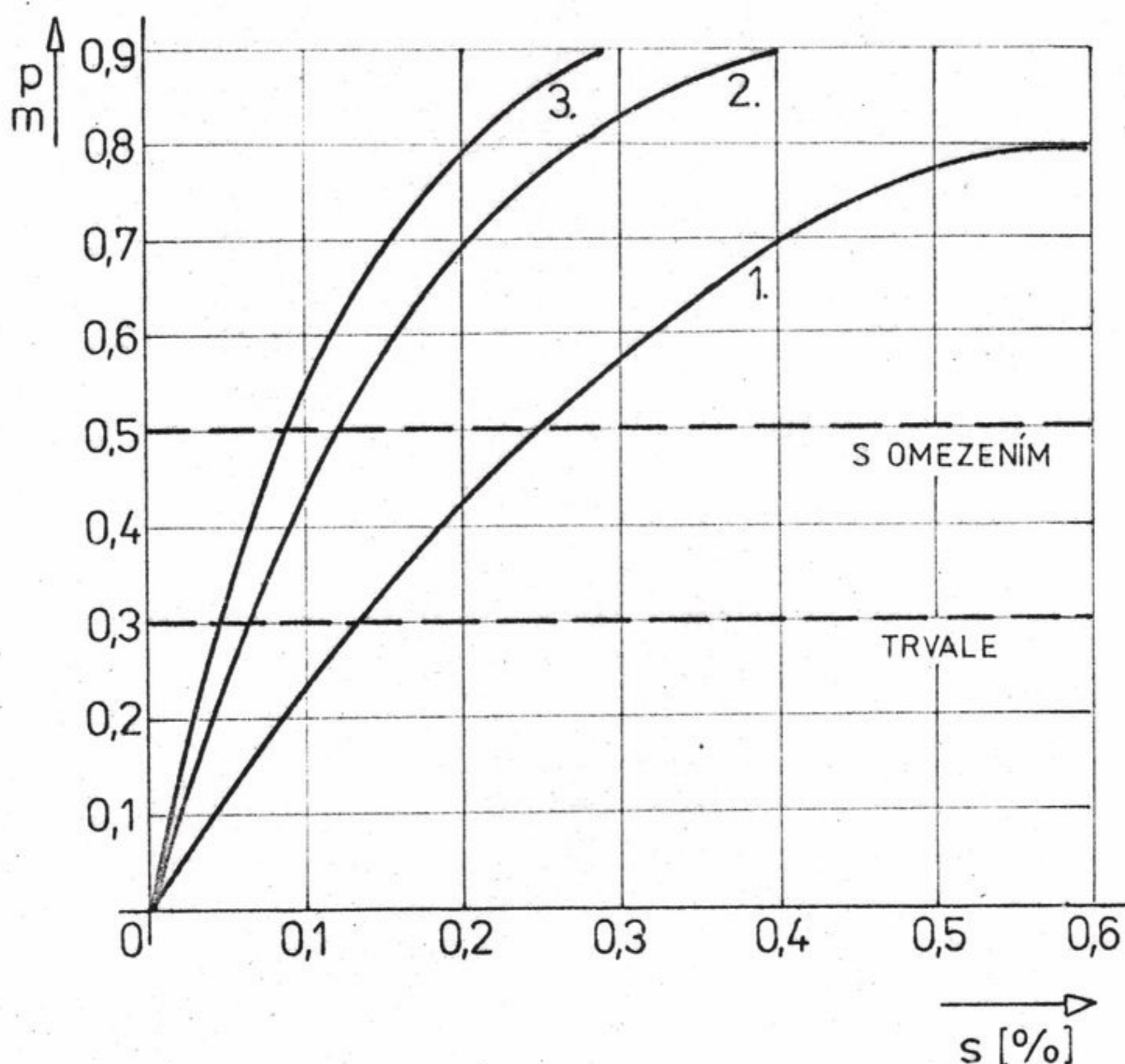
Všechny uvedené hodnoty jsou poměrné jednotky, přičemž:

- m_d' ... složka momentu daná změnou společného magnetického toku budícího vinutí a tlumícího vinutí v podélné ose,
- m_d'' ... složka daná změnou rozptylových magnetických toků obou elektrických obvodů rotoru v podélné ose,
- m_q'' ... složka momentu daná proudy v tlumícím obvodu rotoru v příčné ose.

Podíl jednotlivých složek momentu na celkový asynchronní moment alternátoru při proměnném skluzu je zakreslen na obr. 2.9.

Velikost asynchronního momentu a činného výkonu alternátoru závisí také na způsobu spojení budicího vinutí při asynchronním chodu. Na obr. 2.47. je nakreslen průběh asynchronního momentu a činného výkonu (v poměrných hodnotách) na skluzu pro tři základní stavy :

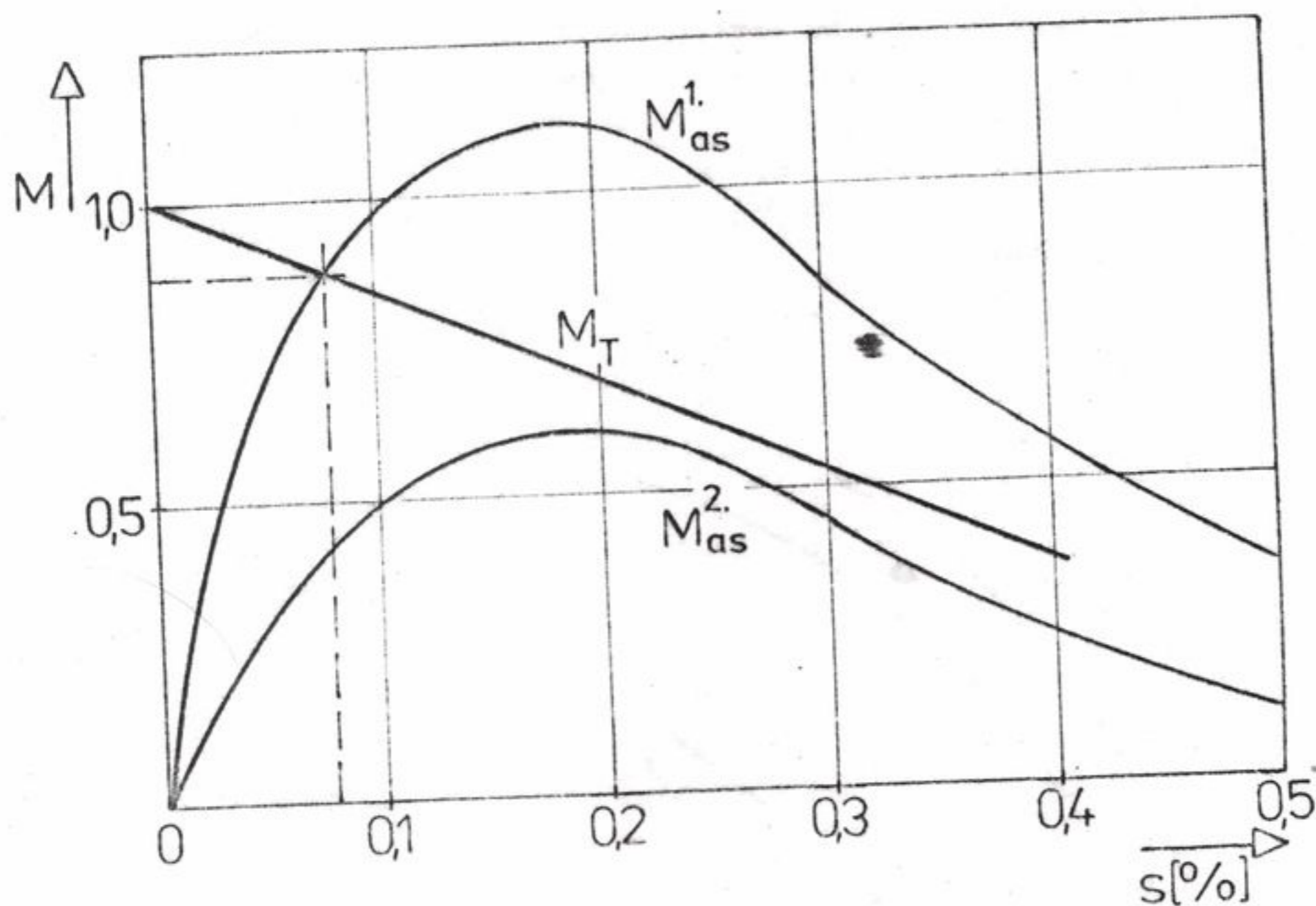
- 1/ budicí vinutí je rozpojeno,
- 2/ budicí vinutí je spojeno přes usměrňovač,
- 3/ budicí vinutí je spojeno nakrátko.



Obr. 2.47. Závislost asynchronního momentu a výkonu na skluzu.

Z obr. 2.47. je zřejmé, že nejvýhodnější případ pro provoz alternátoru v asynchronním chodu je spojení vinutí nakrátko. Při rozpojeném vinutí je asynchronní moment menší a navíc se objevuje nebezpečí nepřipustného namáhání izolace rotorového vinutí zvýšeným napětím, které se indukuje ve vinutí rotoru a má frekvenci odpovídající skluzu rotoru. Výkon turbíny je regulován při rostoucích otáčkách na hodnotu nižší až se provoz ustálí v rovnovážném bodě na takových otáčkách, které odpovídají průsečíku křivky asynchronního momentu alternátoru s charakteristikou regulátoru turbíny.

Situace je znázorněna na obr. 2.48.



Obr. 2.48. Regulace výkonu při asynchronním chodu alternátoru.

kde :

M_T ... charakteristika regulátoru turbíny

M_{as} .. asynchronní moment alternátoru

V provozních podmínkách se skluz turboalternátoru pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,3 %. U velkých strojů připojených do elektrizační soustavy přes velkou impedanci, může ležet vrchol křivky asynchronního momentu turboalternátoru pod charakteristikou regulátoru turbíny, takže při ztrátě buzení alternátoru dojde k proběhnutí otáček a odstavení soustrojí pojistným regulátorem turbíny.

Činný výkon, který předává alternátor v asynchronním chodu do sítě je :

$$P_a = R_t \cdot I_t^2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \quad (2.97)$$

kde :

R_t ... odpor tlumiče

I_t ... proud v tlumiči

s ... skluz

Výkon, který se akumuluje jako přídavná ztráta v tlumiči je:

$$P_t = R_t \cdot I_t^2 = P_a \cdot \frac{s}{1-s} \quad (2.98)$$

Například pro turboalternátor 110 MW, který pracuje v asynchronním chodu s polovičním výkonem při skluzu 0,1 % jsou přídavné ztráty v rotoru podle (2.98) :

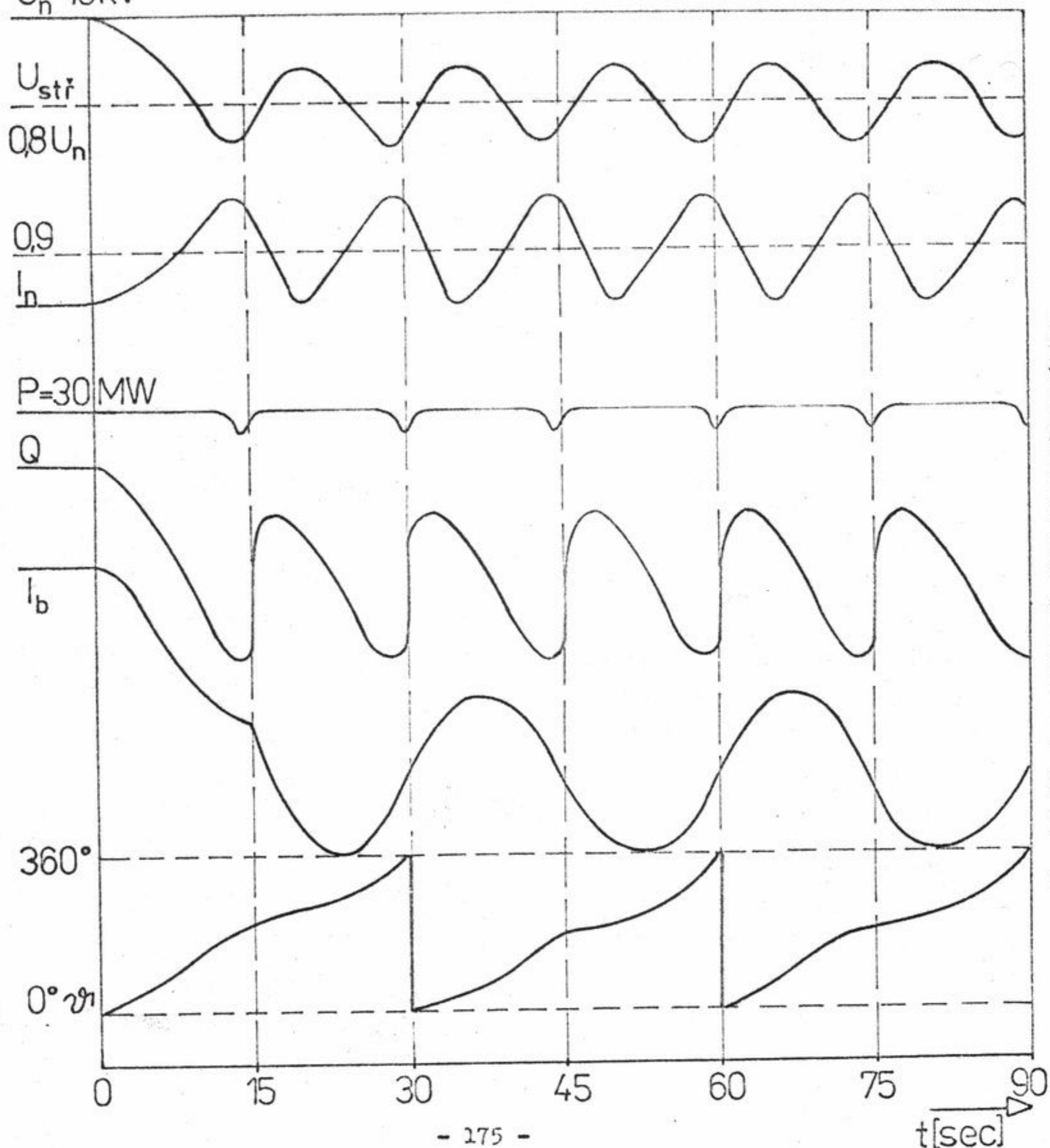
$$P_t = 0,5 \cdot 110 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,001}{1-0,001} = \underline{55 \text{ kW}}$$

↑ - skokem stator

Nepříznivé vlivy asynchronního chodu alternátoru můžeme shrnout v následujících bodech :

- proudy skluzové frekvence uzavírající se v tělese rotoru způsobují jeho přídavný ohřev,
- je-li budicí obvod přerušen, indukuje se v budicím vinutí střídavé napětí, které nemá izolaci budicího vinutí a připojená zařízení budicí soustavy,
- stroj odebírá ze sítě velký induktivní výkon, státorem protéká velký proud, který otepluje statorové vinutí,
- v čelních prostorech statoru dochází v důsledku rozptylových toků k výrazným místním ohřevům stahovací konstrukce a prvních paketů plechů,
- kolísání činného a jalového výkonu je zvlášť výrazné při spojení budicího vinutí přes usměrňovač, který propouští střídavý proud skluzové frekvence jen v jedné půlperiodě v propustném směru. Obecně je kolísání činného a jalového výkonu způsobeno nestejnými parametry v podélné a příčné ose stroje,
- provoz vlastní spotřeby bloku s asynchronně pracujícím alternátorem není reálný bez zajištění rezervního napájení (automatického zésokou rezervy) v důsledku poklesu napětí a krytí spotřeby jalové energie.

Na obr. 2.49. jsou jako příklad uvedeny průběhy základních hodnot turboalternátoru 62,5 MVA pracujícího v asynchronním chodu se skluzem 0,07 % při spojeném rotoru nakrátko $U_n = 10 \text{ kV}$



Obr. 2.49. Asynchronní chod turboalternátoru

Podle provozního předpisu smí být alternátor pracující v asynchronním chodu při činném zatížení menším než 30 % provozován neomezeně dlouho, při činném zatížení od 30% do 50% je dovolená doba provozu 10 min. Je-li činné zatížení větší než 50% je dovolená doba provozu 1 min. Tyto hodnoty platí pro turboalternátor 235 MVA.

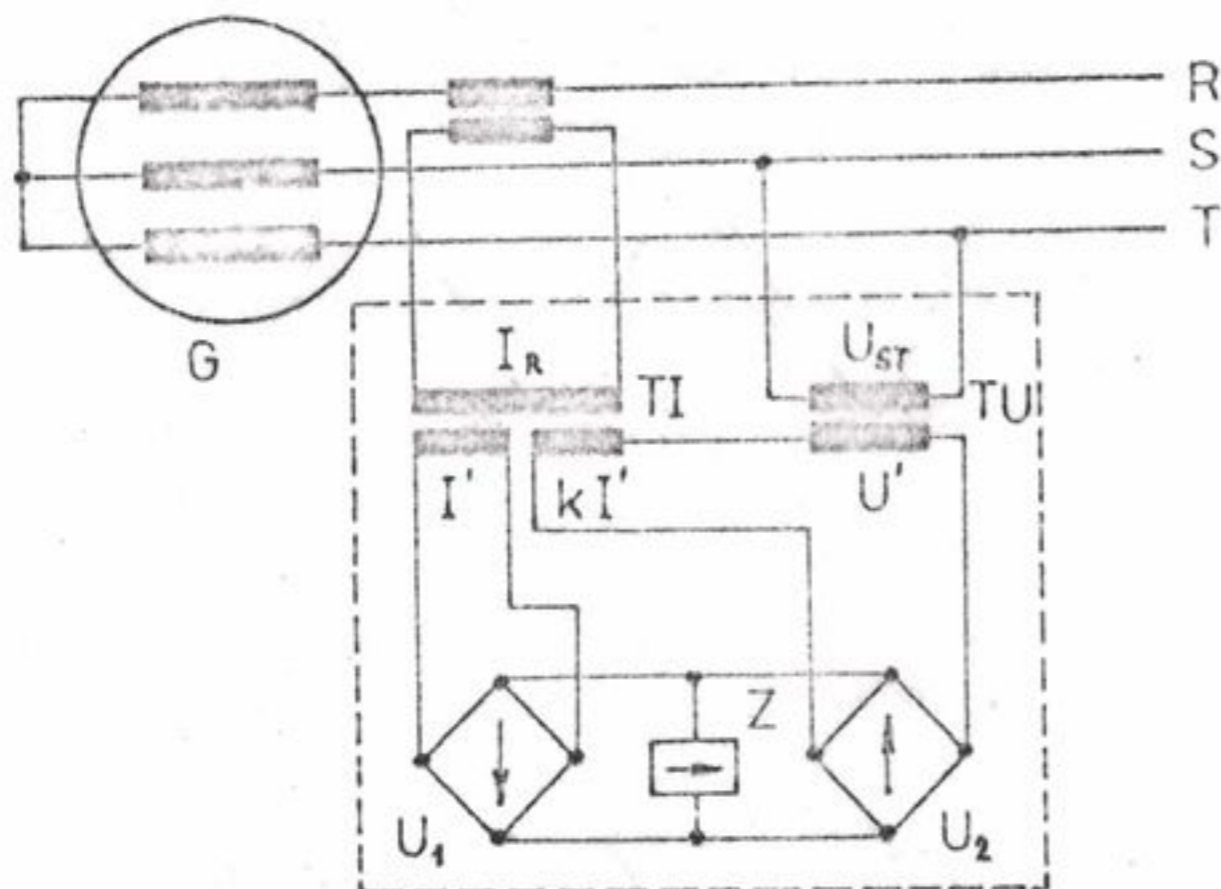
Při řešení návrhu a funkce ochrany alternátoru s vyniklými póly při ztrátě buzení je třeba postupovat jinak než u strojů s hladkým rotorem.

U hydroalternátorů je poměrný asynchronní moment stroje menší než u turboalternátorů, bývá zpravidla 50-60% jmenovitého momentu. Po ztrátě buzení hydroalternátoru při provozu se jmenovitým zatížením se ustálí asynchronní chod u strojů s tlumičem při skluzu 3 až 5 % za předpokladu značného snížení činného výkonu.

V důsledku velkého skluzu jsou při asynchronním chodu velké přídavné ztráty v rotoru hydroalternátoru, proudové a momentové rázy jsou značné. Zásadně se z těchto důvodů asynchronní chod u hydroalternátorů nepřipouští, ochrana při ztrátě buzení u těchto strojů dává povely pro rychlé odstavení a odpojení od sítě.

Ochrana při ztrátě buzení alternátoru je impedančního principu, protože sledování velikosti budícího proudu nemůže být vyhovujícím údajem pro činnost ochrany při ztrátě buzení a asynchronním chodu stroje. Impedanční článek je nastaven tak, aby měřil překročení meze statické stability alternátoru. Ochrana se doplňuje podpětovým článkem (nastavení zhruba na $0,7 U_n$) a nadproudovým článkem (nastavení na $1,25$ až $1,3 I_n$). Časové zpoždění působení ochrany se pohybuje mezi 2 - 3 sec. Ochrana musí být stabilizována proti náběhu při kývání stroje.

Na obr. 2.50. je zásadní schéma zapojení ochrany při ztrátě buzení:



Obr. 2.50. Ochrana při ztrátě buzení

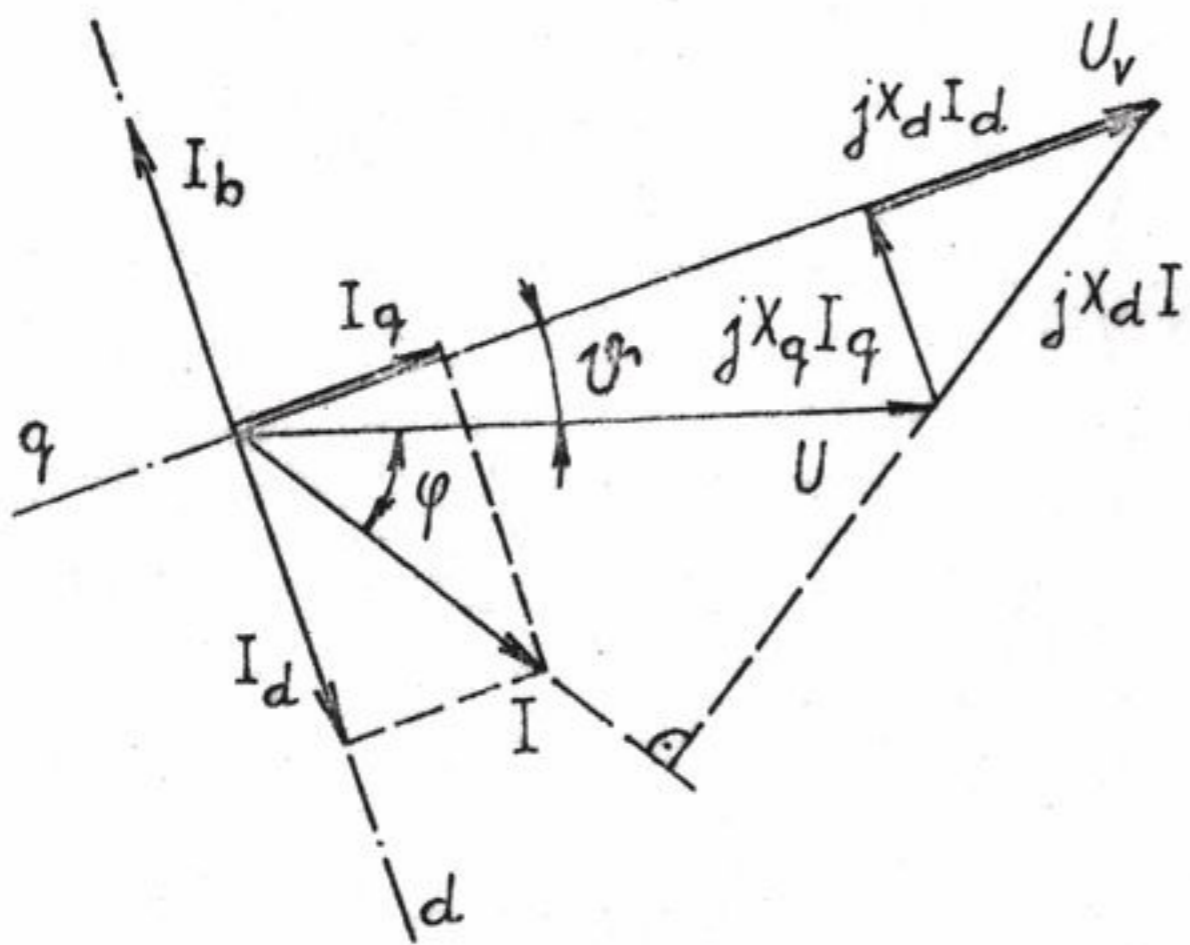
Proud a napětí se měří na výstupu alternátoru a jsou vstupními hodnotami ochrany. Pomocné transformátory ochrany na napěťové straně TU a proudové straně TI s kompenzací KI' převádí měřené a upravené hodnoty proudu a napětí přes usměrňovače na měřící článek Z.

Asynchronní chod motorický

Podmínkou asynchronního motorického chodu je ztráta buzení turboalternátoru za stavu, kdy přívod páry do turbíny je uzavřen a nedojde k působení zpětné wattové ochrany. Za tohoto stavu se indukují ze statoru do rotoru proudy skluzové frekvence, které vytváří točivý moment. Následkem toho dochází k nadměrnému ohřevu povrchových částí tělesa rotoru,

zejména v okolí vyvažovacích šroubů a v místech styku drážkových klínů. Z těchto důvodů musí být stroj odpojen od sítě v krátkém čase.

Pro synchronní alternátor se svorkovým napětím U a proudem statoru I podle fázor. diagr. na obr. 2.51 platí :



Obr. 2.51. Fázorový diagram alternátoru

$$X_q I_q = U \sin \psi \quad (2.99)$$

$$U_v - X_d I_d = U \cos \psi \quad (2.100)$$

$$I = I_q + j I_d \quad (2.101)$$

kde :

ψ ... zátěžný úhel

I_q ... příčná složka proudu statoru I

I_d ... podélná složka proudu statoru I

U_v ... vnitřní napětí alternátoru

X_d ... synchronní reaktance

X_q ... reaktance alternátoru v příčné ose

Pro mez statické stability synchronního stroje je $\psi = 90^\circ$. Pak vztahy (2.99) a (2.100) přejdou na tvar :

$$X_q I_q = U$$

$$X_d I_d = U_v$$

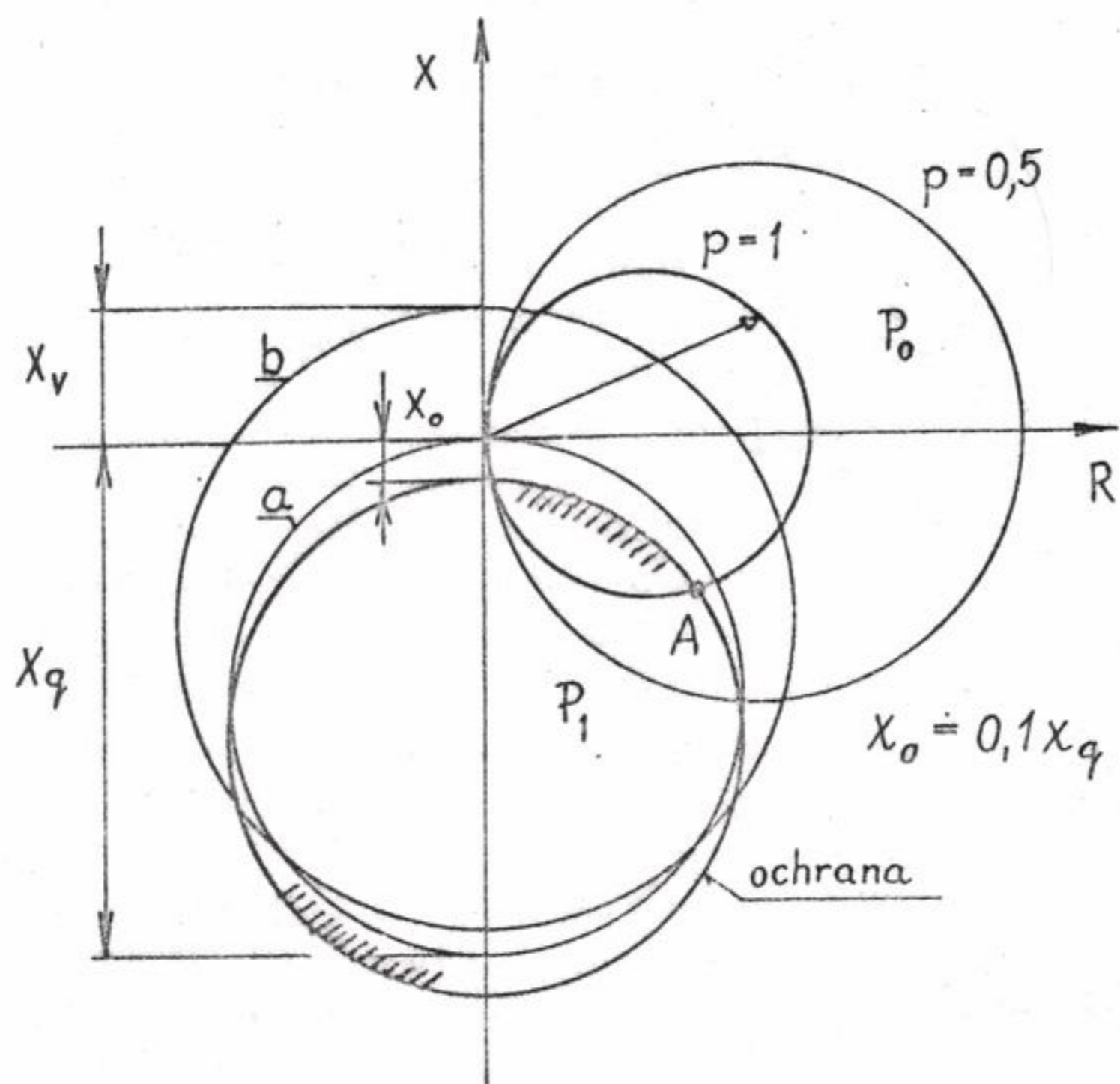
Dosadíme do (2.101) :

$$I = I_q + j I_d = \frac{U}{X_q} + j \frac{U_v}{X_d} \quad (2.102)$$

Impedance alternátoru na mezi statické stability :

$$Z_a = \frac{U}{I} = \frac{U}{\frac{U}{X_q} + j \frac{U_v}{X_d}} \quad (2.103)$$

V impedanční rovině znázorněné na obr. 2.52 bude tento vztah představovat kružnici procházející počátkem souřadnic (označena písmenem a).



Obr. 2.52. Charakteristika ochrany při ztrátě buzení

Pro stroj, pracující do elektrizační soustavy přes vnější reaktanci X_v do sítě, platí pro impedanci měřenou ochranou:

$$Z_b = \frac{U}{\frac{U}{(X_q + X_v)} + \frac{U_v}{(X_d + X_v)}} \quad (2.104)$$

V impedanční rovině na obr. 2.52 bude tento vztah vyjádřen kružnicí označenou písmenem b.

Provoz alternátoru při napětí odlišném od jmenovitého

Podle ČSN připouští výrobce i provozní pravidla pro alternátory kolísání napětí v rozmezí $\pm 5\% U_n$, kdy musí alternátor být schopen trvale dodávat jmenovitý výkon, aniž by došlo k překročení dovolené meze oteplení jednotlivých částí stroje.

Při jmenovitém napětí má alternátor maximální účinnost a není proto z ekonomických hledisek žádoucí, aby byl alternátor při svém jmenovitém zatížení provozován s odlišným napětím.

Provoz elektrické sítě si někdy vynucuje provozovat alternátory v podmínkách, kdy není dodržena ani hodnota jmenovitého napětí, ani hodnota jmenovité frekvence.

Některé mimořádné nebo havarijní stavy v ES, případně v samotné elektrárně mají za následek odpojení alternátoru od sítě a vyžadují, aby alternátor pracoval jako zdroj pro zajištění vlastní spotřeby po určitou omezenou dobu.

Provoz alternátoru se sníženým kmitočtem

Při poklesu frekvence v elektrizační soustavě dochází nejprve k odlehčování sítě. Při dosažení nastavené hranice kmitočtu jsou odpojovány méně důležité oblasti spotřeby elektrické energie ve vybraných rozvodnách od sítě. Při dalším snížení - pod hranici 48,5 Hz nelze

u převážné většiny turboalternátorů doporučit trvalý provoz.

Při poklesu frekvence na hodnotu 47,5 Hz již musí být alternátory odpojovány s časovým zpožděním od sítě a zabezpečují chod vlastní spotřeby. Při odděleném provozu oblastí elektrizační soustavy pak může dojít ke kolísání hodnot napětí, frekvence a výkonu a je třeba posuzovat provoz alternátoru při těchto mimořádných stavech.

Provoz alternátoru při zvýšeném napětí

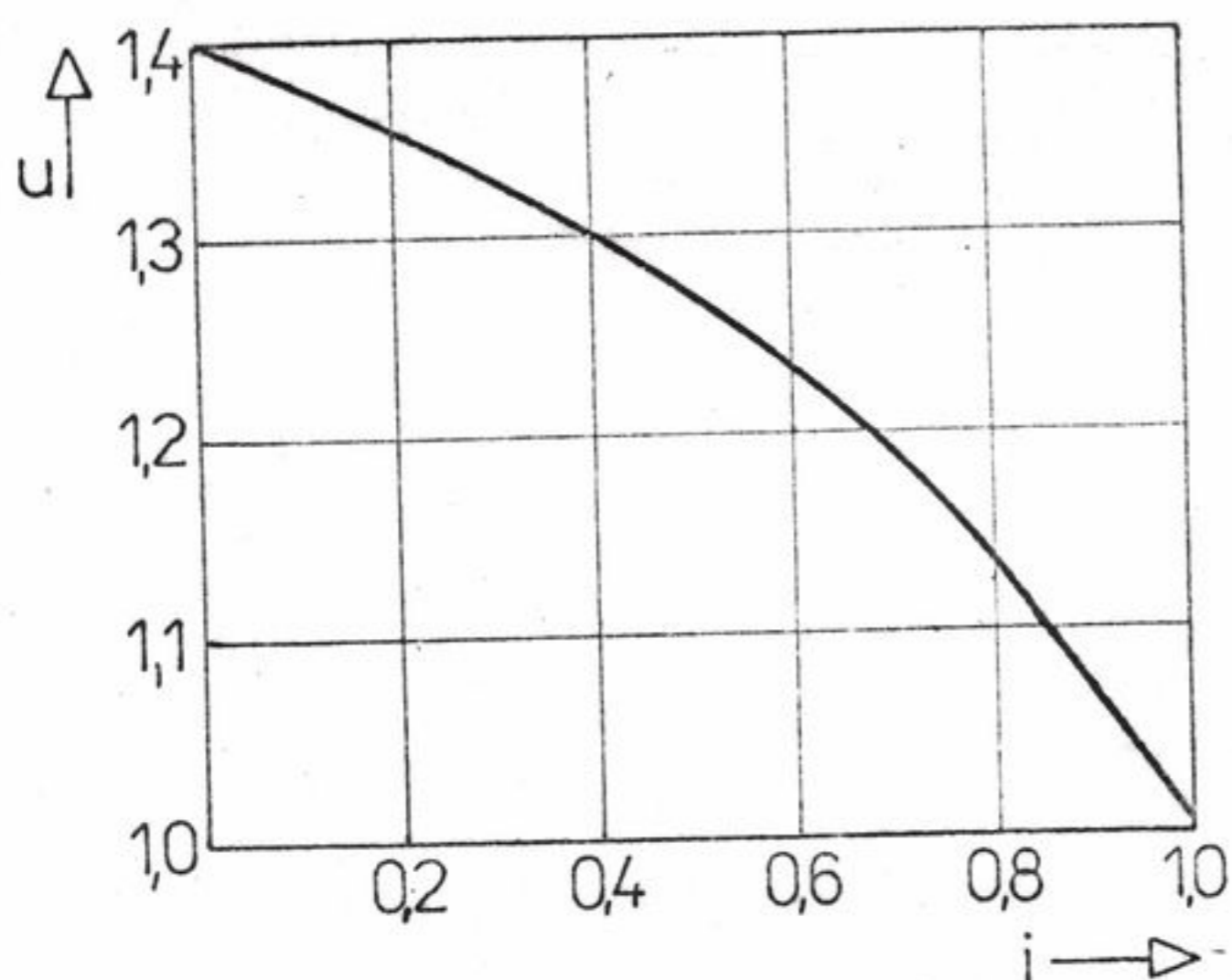
Provoz alternátoru při zvýšení napětí nad hodnotu $1,05 U_n$ je možné povolit trvale do hodnoty $1,1 U_n$ ale za respektování dalších omezujících faktorů :

- nesmí být překročena hodnota jmenovitého budicího proudu a nesmí dojít ke zvýšenému oteplení budicího vinutí alternátoru,
- zvýšené sycení železa ke kterému při tomto stavu dochází nesmí vést k nedovolenému oteplení pláště, zubů a magnetického obvodu alternátoru,
- u vinutí, které má již snížené parametry elektrické pevnosti izolace statorového vinutí nesmí dojít k jeho ohrožení vlivem zvýšeného napětí na svorkách statoru,
- vlivem zvýšení rozptylových toků nesmí dojít ke zvýšenému lokálnímu ohřevu aktivních částí a konstrukčních částí alternátoru.

Ke zvýšení napětí na svorkách alternátoru při konstantním buzení může dojít tehdy, jestliže se sníží zatížení stroje, to znamená že poklesne proud v rotoru.

Kdyby alternátor pracoval se zvýšeným napětím při jmenovitém zatížení bylo by to způsobeno například zvýšeným buzením, kdy budicí proud by byl větší než jmenovitý budicí proud. Při náhlém odpojení alternátoru od sítě by jeho napětí mohlo dosáhnout vysokých hodnot. Proto je třeba udržovat velikost budicího proudu na jeho jmenovité hodnotě.

Na obr. 2.53. je uvedena závislost napětí alternátoru na jeho zatížení:



$$i = \frac{I}{I_n}$$
$$u = \frac{U}{U_n}$$

Obr. 2.53. Závislost napětí alternátoru na zatížení

Ztráty v železe jsou úměrné čtverci magnetického toku nebo také čtverci vnitřního elektromotorického napětí, které se zvětšuje s růstem napětí statoru. Teplota magnetického obvodu je určena převážně těmito ztrátami, neboť ztráty ve vinutí statoru jsou ve formě tepelné energie odváděny chladicí vodou, protékající dutými vodiči statorového vinutí. Kromě toho jsou v železe v převážné míře větší ztráty než v mědi statoru. Protože teplota magnetického obvodu statoru je však při jmenovitých hodnotách zatížení pod mezí dovolených teplot, je možné připustit trvalé zvýšení napětí na hodnotu $1,1 U_n$.

Při zvýšeném statorovém napětí alternátoru dochází k přesycení jeho magnetického obvodu a následkem toho dojde k několikanásobnému vzrůstu magnetických rozptylových toků. Tento jev již nastává při zvýšeném napětí nad hodnotu $1,05 U_n$. V konstrukčních částech alternátoru se pak indukují elektromotorická napětí, která protlačují přidavné proudy v plášti a dalších částech vně statoru. Nebezpečný přidavný ohřev může nastat zejména ve stykových plochách určitých konstrukčních částí a následkem toho dochází k velkým lokálním oteplením. Tento faktor se jeví jako omezující pro provoz alternátoru při zvýšeném napětí a platí zde omezení pro většinu alternátorů dané hranicí $1,1 U_n$. Při tom proud statoru nesmí překročit hodnotu $0,85 I_n$, z čehož vyplývá, že maximální povolený zdánlivý výkon alternátorů $0,955 S_n$.

Provoz alternátoru se sníženým napětím

Minimální přípustné napětí alternátoru není určeno jen chováním alternátoru, ale také jeho zátěží. Minimální hodnota napětí se udává $0,85 U_n$ a je určena hlavně chováním pohonů ve vlastní spotřebě bloku.

Moment asynchronních motorů se snižuje s kvadrátem poklesu napětí, čímž se snižuje výkon pohonu technologického zařízení.

Například u vysokotlaké napáječky poklesne přepravované množství s třetí mocninou poklesu napětí a v důsledku toho dochází k celkovému omezení výkonu bloku. Při poklesu napětí, kdy parametry všech technologických procesů se prudce snižují, je pak velmi stíženo samonajíždění včetně automatického zapnutí rezervy.

Provoz alternátoru při napětí sníženém pod hodnotu $0,95 U_n$ je dovolen pouze při sníženém výkonu. Pokud by měl alternátor dodávat jmenovitý výkon, musel by růst statorový proud a ten by vyvolal zvýšené oteplení statorového vinutí. Mezní hodnota proudu při sníženém napětí na $0,95 U_n$ je dána hodnotou $1,05 I_n$, která odpovídá provozu se jmenovitým výkonem.

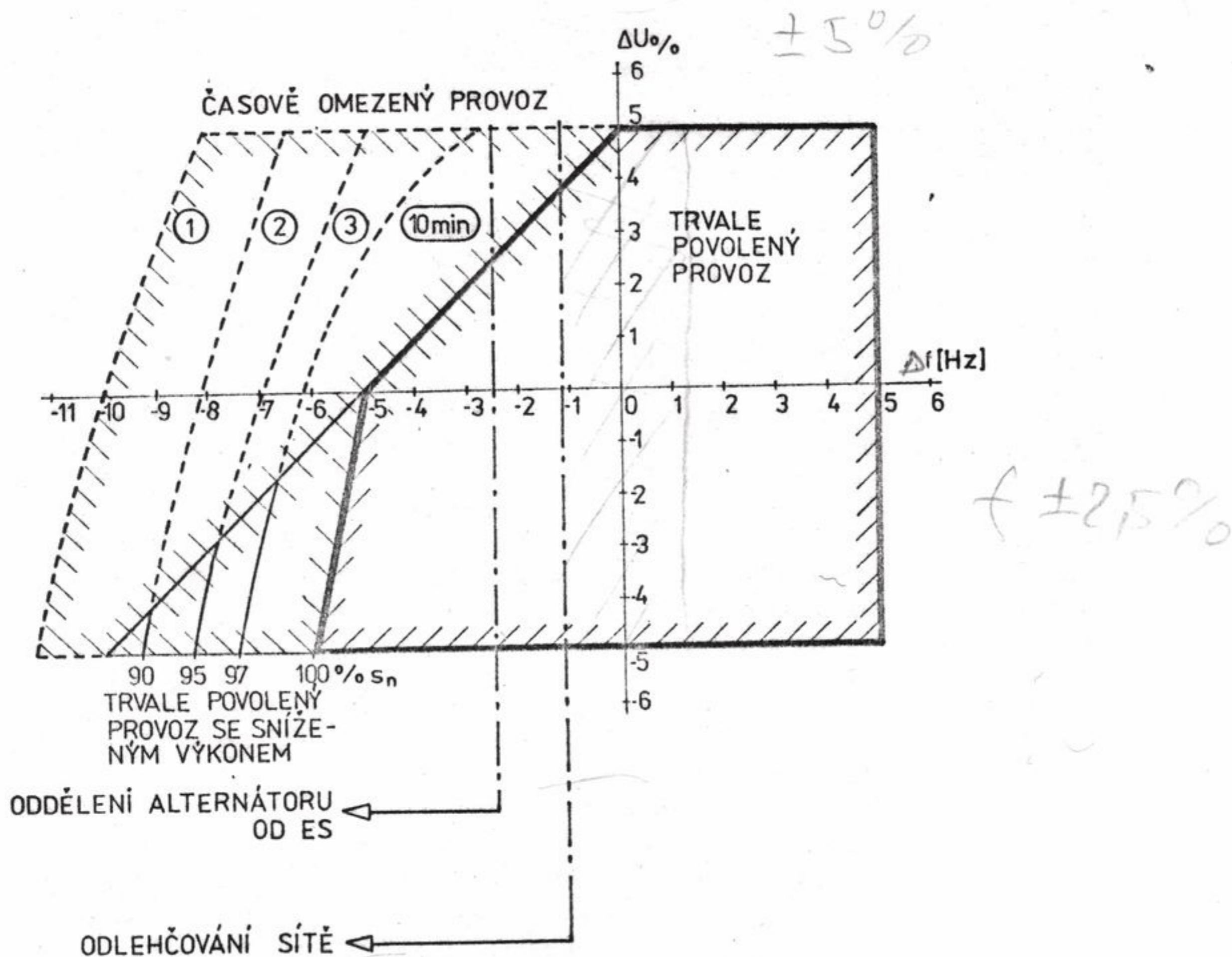
Minimální hodnota napětí je rovněž dána zapojením bloku do elektrizační soustavy z hlediska stability provozu synchronního alternátoru. Pokles napětí zhoršuje podmínky statické i dynamické stability stroje pokud by nedošlo k přibuzení stroje a následnému zvýšení vnitřního napětí i svorkového napětí alternátoru vlivem zásahu regulace buzení.

Provoz alternátoru vykazuje při sníženém napětí zhoršení jeho účinnosti a nezaručuje jak spolehlivý provoz vlastní spotřeby bloku, tak i jeho stabilní spolupráci s vnější elektrickou sítí. Proto je minimální povolená hranice poklesu napětí dána hranicí $0,85 U_n$ přičemž je třeba co nejrychleji obnovit jmenovitý provoz.

Provoz alternátoru se sníženým kmitočtem a současným poklesem napětí

V příkladu na obr. 2.54. je patrné, že provoz alternátoru lze rozdělit do tří oblastí :

- 1/ Trvalý provoz alternátoru při změnách napětí a frekvence,
- 2/ Trvalý provoz alternátoru při změnách napětí a frekvence a sníženém výkonu.
- 3/ Časově omezený provoz při změnách napětí a frekvence a sníženém výkonu :



Obr. 2.54. Oblasti provozu alternátoru

Zkoušky alternátorů

Základní zkoušky alternátorů jsou předepsány ČSN 350201 a ČSN 350010 .
Podle charakteru vlastností dělíme zkoušky na mechanické, elektrické, oteplovací a ostatní.

1. Mechanické zkoušky členíme na:

- rozměrové
- defektoskopické
- pevnostní
- mechanického chodu při normálních i zvýšených otáčkách
- chvění

2. Elektrické zkoušky jsou :

- měření při zvýšeném přiloženém napětí
- měření ztrátového činitele
- měření charakteristik naprzdno a nakrátko
- měření reaktancí a časových konstant
- měření odporů
- měření izolačních stavů

3. Oteplovací zkoušky určují :

- oteplení magnetického obvodu statoru a rotoru
- oteplení vinutí statoru a rotoru
- oteplení při normálním provozu i při mimořádných provozních stavech

4. Ostatní zkoušky jsou například :

- zkoušky těsnosti ve vodíkovém hospodářství
- hospodářství chladicí vody statoru a olejového hospodářství
- zkoušky hlučnosti
- měření ventilačních poměrů

Profylaktické zkušební metody alternátorů

Poruchy na alternátorech vznikají nejvíce ve statorovém vinutí, budícím vinutí, sběracím ústrojí a obvodech hlavního a pomocného budiče.

Příčinou vzniku poruch jsou vady materiálu, nesprávné technologické postupy a výrobní vady, provozní stárnutí materiálu a zvýšené namáhání materiálu při mimořádných provozních stavech. Profylaktické zkoušení alternátorů umožňuje získat znalosti o celkovém stupni stárnutí izolačního systému, případně napomáhá k odhalení hrubých lokálních vad.

Za nedestruktivní označujeme ty zkoušky, které nezpůsobí znehodnocení ani zhoršení stavu izolace.

Destruktivní zkoušky mohou zkoušený systém lokálně poškodit. Je však výhodnější, jestliže je například podezřelý izolační systém během plánované generální opravy znehodnocen zkouškou, kdy je k dispozici čas, odborný personál, materiál a další technické prostředky k odstranění poruchy. Zamezí se tak možné nečekané havarii v období, kdy je situace pro odstavení stroje nepříznivá, například v zimním období.

Jednou z hlavních profylaktických zkoušek je posouzení izolačního systému, které se provádí před každým uvedením do provozu a dále pak v intervalech 1,5 až 3 roky.

V současné době se používají a dále rozvíjejí vedle elektrických zkušebních metod metody strukturálních zkoušek. Patří sem plynová a gelová chromatografie, infračervená spektroskopie a porozimetrie. Tyto metody umožní indikovat prvotní příčiny zhoršení kvality izolace a to změnou jeho strukturálních vlastností. Jsou proto velmi důležité pro posouzení kvality izolace z hlediska prevence poruch, neboť určují trend zhoršování izolačního stavu. Metody elektrické zachycují pouze důsledky změn ve struktuře izolace a určují chování zkoumaného systému jako celku a některé lokální vady a narušení se při měření nemusí projevit.

Napěťové zkoušky

Rozhodujícím činitelem pro provozuschopnost alternátoru je elektrická pevnost izolačního systému. Protože není známa diagnostická metoda, která by tuto hodnotu určila bez rizika poškození je nutno ověřovat stav elektrické pevnosti pomocí zvýšeného napětí. Při zkoušce zvýšeným napětím lze použít střídavé nebo stejnosměrné napětí.

Zkouška zvýšeným střídavým napětím se provádí obvykle po dobu 1 minuty. Velikost zkušebního napětí se volí tak, aby byla zabezpečena úroveň elektrické pevnosti izolace v provozu i při různých typech přepětí. Výchozím parametrem je zde hodnota jmenovitého napětí zařízení. Při této zkoušce se obvykle zjišťují hrubé poruchy, které mají příčinu v provozních podmínkách stroje - častá a déletrvající přetížení, vlhké a prašné prostředí, nebo také mohou být způsobeny konstrukčními nebo výrobními chybami u nových zařízení.

Při zkoušce zvýšeným střídavým napětím se obvykle odhalí jen některé poruchy, jako například porušení izolace statorových tyčí v drážce.

Zkouška zvýšeným střídavým napětím se provádí pomocí zkušebního transformátoru, který je s ohledem na požadované parametry - napětí a výkon poměrně robustní.

Při zkoušce zvýšeným stejnosměrným napětím nedochází obvykle k vážnému poškození izolačního stavu vinutí neboť při této zkoušce má zkoušený systém vyšší izolační odpor a elektrická pevnost při namáhání přiloženým stejnosměrným napětím je prakticky časově nezávislá (i po dobu několika hodin).

Rozložení potenciálu při stejnosměrném napětí je odlišné proti rozložení při připojení střídavého napětí. Rozložení stejnosměrného napětí na jednotlivých vrstvách izolace je dáno proudy tekoucími po jejich povrchu a různou vodivostí izolace podél zkoušeného úseku. Tak se dá lépe lokalizovat slabší místo v nehomogenní izolaci než při aplikaci napětí střídavého, kde je rozložení napětí dáno kapacitou vodiče proti magnetickému jádru. Velikost stejnosměrného zkušebního napětí se volí asi 1,6 krát vyšší než napětí střídavého. Průrazné napětí při namáhání izolace stejnosměrným napětím je u nové izolace asi $2,2 \div 2,7$ krát vyšší než pro střídavé napětí.

Měření izolačních odporů

Tato zkouška se provádí u každého alternátoru při uvádění do provozu po delší odstávce. Je to metoda jednoduchá a spolehlivá, která dává informaci o stavu izolačního systému. Reaguje citlivě na znečištění prachem nebo olejem, na absorbovanou vlhkost nebo mechanické poškození. Izolační odpor závisí zejména na těchto faktorech :

- vlhkost prostředí,
- teplota prostředí,
- druhu izolační soustavy,
- způsobu výroby sledované soustavy.

Minimální velikost izolačního odporu při provozní teplotě se určí podle vztahu (dle ČSN 35 00 00) :

$$R_{iz} = \frac{U_n}{1000 + 10P_n} \quad [M\Omega ; V ; MW] \quad (2.105)$$

kde :

U_n ... jmenovité napětí alternátoru [V]

P_n ... jmenovitý výkon alternátoru [MW]

Například pro alternátor $P_n = 200$ MW

$U_n = 15$ kV

$$R_{iz} = \frac{15 \cdot 10^3}{1000 + 2000} = \underline{5 M\Omega}$$

Izolační odpor klesá s rostoucí teplotou a to obvykle tím více, čím je větší navlhnutí izolace.

Dále je třeba si uvědomit, že k poškození izolace při průrazu dojde tepelnými účinky proudu prosakujícího vinutím. U vinutí, které má izolaci navlhlou ale nepoškozenou, protéká prosakující proud velkou plochou, takže jeho hustota je malá a k poškození izolace zpravidla nedojde. Jestliže je však izolace lokálně poškozená, je hodnota prosakujícího proudu v tomto místě velká a v tomto případě může dojít k průrazu i přes vysokou hodnotu neměřeného izolačního odporu.

Pro hrubou orientaci platí, že izolační odpor statorového vinutí je dobrý, jestliže dosahuje v zahřátém stavu 15 MΩ. Ve studeném stavu je tato požadovaná hodnota alespoň 5 x vyšší. Alternátor, jehož statorové vinutí má v zahřátém stavu t.j. při provozní teplotě izolační odpor menší než 1MΩ/ kV jmenovitého napětí, se smí nabudit a provozovat jen vyjíměčně. Zjistí-li se, že izolační odpor statorového vinutí je pod přípustnou hodnotou R_{iz} zjištěnou výpočtem, musí se vinutí vysoušet tak dlouho, až se dosáhne požadované hodnoty.

Sušení statorového vinutí za chodu stroje:

- a/ provádíme při chodu naprázdno v nenabuzeném stavu, kdy se stroj ohřívá ventilačními ztrátami,
- b/ při chodu nakrátko se stroj zahřívá joulovými ztrátami ve vodičích statoru při sníženém buzení.

Sušení statorového vinutí za klidu stroje provádíme :

- a/ indukční metodou, kdy se stroj zahřívá ztrátami v aktivním železe magnetického obvodu,
- b/ stejnosměrným proudem ze zvláštního zdroje, který prochází vinutím statoru,
- c/ horkým vzduchem.

Ohřátí stroje na dovolenou sušící teplotu má být postupné a tím pomalejší, čím je izolace vlhčí. Je-li izolační odpor vlhkého stroje menší než 100 kΩ smí se stroj sušit při nejvyšší teplotě 65° vlastním nebo přiváděným teplem. Teplota při sušení nemá přestoupit hodnotu 90° až 105°C, která je dána provedením a třídou izolace. Pryžová izolace vodičů smí být vystavena teplotě nejvýše 90°C. Při sušení rotoru je třeba dbát, aby teplota sběracích kroužků nepřekročila teplotu 110°C. Každou hodinu je třeba otočit rotorem o 180°. Při sušení se provádí každých 15 min současně měření teploty a měření izolačního odporu.

Pro měření teploty se používá buď teploměrných sond zabudovaných ve stroji, nebo teploměrů, umístěných na vhodných místech vinutí.

Rotorové vinutí

U rotorového vinutí je minimální hodnota izolačního odporu 7MΩ. Teplota rotorového vinutí se zjišťuje přesným způsobem a to měřením přírůstku jeho odporu s rostoucí teplotou :

$$t_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot (235 + t_1) + t_1 \quad [^{\circ}\text{C} ; \Omega ; ^{\circ}\text{C}] \quad (2.106)$$

kde :

R_1 ... odpor vinutí při teplotě t_1

R_2 ... odpor vinutí při teplotě t_2

t_1 ... teplota studeného vinutí

t_2 ... teplota zvýšená

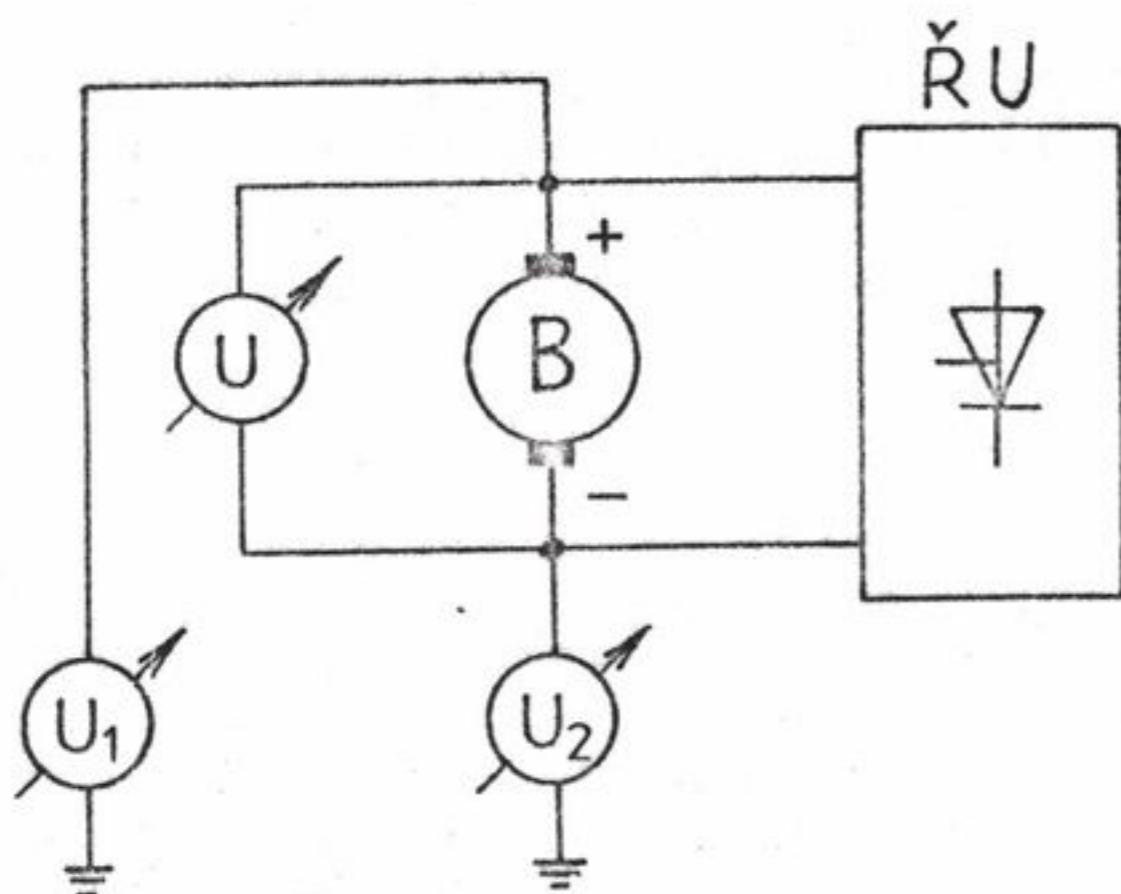
Izolační stav celého budícího obvodu lze také zjišťovat na stroji, který je v provozu podle vztahu :

$$R_{ib} = \left(\frac{U}{U_1 - U_2} - 1 \right) R_v \quad [\Omega, v, \Omega] \quad (2.107)$$

kde značí :

- ŘU ... řízený usměrňovač
- B ... budící vinutí
- R_{ib} ... izolační odpor budícího obvodu [Ω]
- R_v ... vnitřní odpor voltmetru (U) [Ω]
- U ... napětí měřené mezi kroužky rotorového vinutí [V]
- U_1 ... napětí mezi kroužkem \oplus a zemí [V]
- U_2 ... napětí mezi kroužkem \ominus a zemí

Použitý měřicí přístroj musí mít minimální vnitřní odpor $1 \text{ k}\Omega/\text{V}$, měření je třeba provést na jednom měřicím rozsahu :



Obr. 2.55. Měření izolačního stavu budícího obvodu.

Měření ztrátového činitele

Na isolační systém alternátoru můžeme z hlediska měření ztrátového činitele pohlížet jako na dielektrikum řady kondenzátorů, jejichž elektrody tvoří jednak vinutí, jednak železo magnetického obvodu. Na základě měření a jejich statistického zpracování bylo dokázáno, že alternátory, které byly dlouhou dobu v bezporuchovém provozu mají malý ztrátový činitel a jeho vzrůst $\text{dtg}\delta$ je velmi malý. Nelze však říci, že vysoká hodnota ztrátového činitele znamená, že izolace stroje je v havarijním stavu. Měření dielektrických ztrát a určením funkce $\text{tg}\delta = f(U)$ získáváme pouze celkový přehled o stavu izolace bez možnosti rozeznání stupně rozložení ztrát ve vinutí. Porovnáním křivek $\text{tg}\delta = f(U)$ nového vinutí alternátoru z periodicky se opakujících měření v určitých časových intervalech můžeme usuzovat na zhoršený stav izolace. Ztrátový činitel ovlivňuje výše napětí, teplota, absorbovaná vlhkost, částečné výboje.

Měření nabíjecích proudů

Při tomto měření se určuje absorbní charakteristika, která velmi citlivě reaguje na zvlhčení a znečištění izolace. Na statorové vinutí alternátoru se přiloží konstantní stejnosměrné napětí a měří se proud, který protéká izolací. Z tvaru absorbní charakteristiky a absolutní velikosti proudu můžeme odhadnout stav izolačního systému. Měření se provádí při 100,

140 a 180 % hodnoty jmenovitého napětí alternátoru. Pro správné vyhodnocení výsledků je nutné měření periodicky opakovat .

Měření částečných výbojů

V pevném dielektriku jsou dutiny vyplněné plynem. Tyto dutiny vznikají u termo-
setických izolací např. vlivem smrštění pryskyřice při tuhnutí, u termoplastických např.
vyprašování šelku vlivem stárnutí izolace. Kromě toho mohou dutiny vznikat účinkem
velkého elektrického místního namáhání. Při zvyšování střídavého napětí, přiloženého na
elektrody takového dielektrika, objeví se v okolí určité hodnoty aplikovaného napětí
v dutinách výboje. Efektivní hodnotu tohoto napětí nazýváme práh ionizace. Při měření
kapacitního proudu, který teče k elektrodám se tyto pochody projeví jako neuspořádaný
soubor malých, krátkodobých pulzů. Každý pulz odpovídá jednomu výboji v dielektriku. Detek-
ci těchto částečných výbojů lze provádět několika metodami, nejlépe je používat přístrojů,
speciálně pro tento účel zkonstruovaných. Provádění měření částečných výbojů souběžně
s ostatními profylaktickými elektrickými metodami umožňuje přesněji určit stupeň zestár-
nutí izolačních systémů alternátorů.

V čs. energetice jsou zavedeny rutinní profylaktické zkoušky izolačních systémů
statorových vinutí alternátorů podle zvláštní směrnice pro nové stroje před uvedením do
provozu a pro periodické měření strojů v provozu. Směrnice obsahuje i mezní hodnoty, kte-
rých musí být při jednotlivých zkouškách dosahováno.

2.2.2. Provoz transformátorů

Oteplení transformátoru

Dodržování dovolených hodnot oteplení transformátoru zajišťuje jejich projektovanou život-
nost a zachování všech důležitých parametrů transformátoru ve stanovených mezích. Důležitým
úkolem je proto stanovit velikost oteplení pro jednotlivé provozní stavy a to jak v podmín-
kách ustáleného provozu, tak i při přechodných stavech. Dovolené oteplení vinutí transfor-
mátoru je stanoveno pro přirozené změny teploty okolního vzduchu během roku i během dne.
Teplota vinutí daná dovoleným oteplením vinutí (65°C pro izolaci třídy A) a nejvyšší uva-
žovanou teplotou okolí (35°C) je horní mezí teploty vinutí (65° + 35° = 100 °C) , která
je s ohledem na zachování projektované životnosti transformátoru povolena jen několik hodin
za den. To platí pro letní dny, kdy teplota okolního vzduchu dosahuje maxima + 35°C . V os-
tatních případech nesmí být oteplení vinutí při jmenovitém zatížení transformátoru větší
než dovolené oteplení (65 °C) , to znamená v ty dny, kdy teplota vzduchu je menší než 35 °C.
Norma stanoví omezení pro provoz transformátorů , závislé na teplotě okolí tak, že při prům-
ěrné denní teplotě vyšší než je normovaná (25°C) je nutné snížit hodnoty dovolených otep-
lení. Při překročení průměrné denní teploty o p % se snižuje dovolené oteplení také o p %.
Oteplení, která lze v provozu měřit a kontrolovat jsou střední oteplení horních vrstev ole-
je pod víkem transformátoru. Tato oteplení jsou normována pro provoz s jmenovitým zatíže-
ním. Pro potřeby řízení provozu transformátoru byly mnohonásobnými měřeními získány empiric-
ké vzorce, které dovolují regulovat zatížení transformátorů podle měřeného oteplení horních
vrstev oleje.

Ustálené teplotní stavy

Tepelnou rovnováhu vodiče, kterým protéká proud I lze vyjádřit vztahem :

$$I^2 R dt = G c d \vartheta + k S (\vartheta - \vartheta_a) dt$$

(2.108)

kde :

| | |
|---------------------------------|-------------------------------|
| R ... ohmický odpor vodiče | [Ω] |
| G ... hmota vodiče | [kg] |
| c ... měrné teplo | [J/ kg .deg.] |
| ϑ ... teplota vodiče | [deg.] |
| ϑ_a .. teplota okolí | [deg.] |
| k ... součinitel přestupu tepla | [J/m ² . deg. sec] |
| S ... ochlazovací plocha | [m ²] |

Levá strana rovnice představuje vznikající množství tepla, první člen na pravé straně množství tepla, které se spotřebuje na zvýšení teploty vodiče, druhý člen rovnice množství tepla předávaného do okolí. Za předpokladu, že se teplota vodičů vinutí mění v malém rozmezí lze uvažovat :

$$\begin{aligned}R &= \text{konst} \\C &= \text{konst} \\k &= \text{konst}\end{aligned}$$

Řešení diferenciální rovnice tepelné rovnováhy při konstantním proudu I je :

$$\vartheta - \vartheta_a = \frac{RI^2}{kS} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2.109)$$

kde :

$$\tau = \frac{G \cdot c}{k \cdot S}$$

$$\Delta \vartheta = \vartheta - \vartheta_a$$

Pro ustálený provozní stav ($t \rightarrow \infty$) podle (2.109) :

(2.110)

$$\Delta \vartheta_u = \frac{RI^2}{k \cdot S} \quad \text{kde : } \Delta \vartheta_u \dots \text{ustálená hodnota oteplení}$$

Rovnici (2.109) přepíšeme :

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_u \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2.111)$$

Změna oteplení, která vznikne při obecném zatížení ve vztahu ke jmenovitému zatížení, které je dáno jmenovitým proudem I_n oteplením $\Delta \vartheta_n$:

$$\frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_n} = \frac{I^2}{I_n^2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = i^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2.112)$$

Tento vztah umožňuje posouzení změny oteplení podle změny velikosti proudu transformátoru.

Oteplení určitého tělesa způsobené ztrátovým výkonem ΔP je určeno podle (2.110) :

$$\Delta \vartheta_u = \frac{\Delta P}{k \cdot S} \quad (2.113)$$

Pro $k = \text{konst}$

$S = \text{konst}$ dostáváme :

$$\Delta \vartheta_u = \Delta \vartheta_n \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P_n} = \Delta \vartheta_n \Delta p \quad (2.114)$$

Ve skutečnosti není činitel přestupu tepla k konstantní a závisí na teplotním spádu mezi ohřátým tělesem a okolím a to se čtvrtou odmocninou z oteplení :

$$\frac{k_1}{k_2} = \sqrt[4]{\frac{\Delta \vartheta_1}{\Delta \vartheta_2}} \quad (2.115)$$

Velikost činitele přestupu tepla k závisí také na počáteční a konečné teplotě přechodného jevu, ale tuto skutečnost lze při praktických výpočtech zanedbat .

Poměr hodnot oteplení dvou provozních stavů daných ztrátami ΔP_1 a ΔP_2 :

$$\frac{\Delta \vartheta_1}{\Delta \vartheta_2} = \frac{\frac{\Delta P_1}{k_1 S}}{\frac{\Delta P_2}{k_2 S}} = \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \sqrt[4]{\frac{\Delta \vartheta_2}{\Delta \vartheta_1}} \cdot \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}$$

$$\frac{\Delta \vartheta_1}{\Delta \vartheta_2} = \left(\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \right)^{\frac{4}{5}} = \left(\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \right)^{0,8} \quad (2.116)$$

Rovnici (2.114) upřesníme podle (2.116) :

$$\Delta \vartheta_u = \Delta \vartheta_n \cdot (\Delta p)^{0,8} \quad (2.117)$$

Při provozu transformátoru je třeba odvádět teplo, vznikající v důsledku ztrát v primárním a sekundárním vinutí a v aktivním železe transformátoru. Tyto části transformátoru jsou z hlediska přestupu tepla odděleny, vznikající ztrátové teplo je předáváno do chladícího oleje. Rovnici (2.117) lze používat samostatně pro určení teplotních spádů mezi vinutím a olejem a mezi aktivním železem transformátoru a olejem.

Teplotní spád mezi vinutím a olejem je určován velikostí ztrát ve vinutí ΔP_v , které jsou úměrné čtverci proudového zatížení transformátoru. Teplotní spád mezi vinutím a olejem při jmenovitém zatížení :

$$\Delta \vartheta_{\text{von}} (\Delta P_v)^{0,8} = \Delta \vartheta_{\text{von}} (i^2)^{0,8} = \Delta \vartheta_{\text{von}} i^{1,6} \quad (2.118)$$

Odvozený vztah (2.118) souhlasí s výsledky experimentálních měření, podle kterých bylo stanoveno, že teplotní spád mezi vinutím a olejem při různém zatížení transformátoru lze určit podle rovnice :

$$\Delta \vartheta_{vo}^h = \Delta \vartheta_{von}^h \cdot i^\alpha \quad (2.119)$$

α ... koeficient který je závislý na typu vinutí a velikosti přetížení transformátoru. Doporučuje se volit v rozmezí 1,7 až 2,0.

Oteplení oleje je dáno velikostí celkových ztrát transformátoru :

$$\Delta P = \Delta P_v + \Delta P_{Fe} \quad (2.120)$$

Ztráty v železe je možno považovat za konstantní, jejich hodnota je přibližně shodná se ztrátami naprázdno transformátoru. Ztráty ve vinutí jsou úměrné čtverci zatížení

$$\Delta P_v = \Delta P_{vn} \cdot i^2 \quad (2.130)$$

kde :

ΔP_{vn} ... jsou ztráty ve vinutí při jmenovitém zatížení transformátoru.

Poměr ztrát nakrátko ΔP_k a naprázdno ΔP_o :

$$\xi = \frac{\Delta P_k}{\Delta P_o} ; \text{ kde : } \Delta P_{vn} = \Delta P_k ; \Delta P_{Fen} = \Delta P_o$$

hodnotu ξ můžeme uvažovat $\xi = 4$

Celkové poměrné ztráty transformátoru při zatížení i :

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{\Delta P}{\Delta P_n} = \frac{\Delta P_v + \Delta P_{Fe}}{\Delta P_{vn} + \Delta P_{Fen}} = \frac{\Delta P_{vn} i^2 + \Delta P_{Fen}}{\Delta P_{vn} + \Delta P_{Fen}} = \\ &= \frac{1 + \xi i^2}{1 + \xi} \end{aligned} \quad (2.131)$$

$$\text{Pro } \xi = 4 \text{ je : } \Delta p = \frac{1 + 4 i^2}{5} \quad (2.132)$$

Pro oteplení oleje platí :

$$\Delta \vartheta_o^h = \Delta \vartheta_{on}^h (\Delta p)^{0,8} = \Delta \vartheta_{on}^h \cdot \left(\frac{1 + \xi i^2}{1 + \xi} \right) \quad (2.133)$$

Dovolená oteplení vinutí a oteplení horních vrstev oleje jsou určeny normou.

Přechodné teplotní stavy

Vznikají zpravidla při krátkodobých velkých přetíženích. Charakter těchto přetížení vyžaduje respektovat při přechodném procesu změnu velikosti odporu vinutí. S ohledem na dobu trvání přechodného jevu lze zanedbat předávání tepla mezi vinutím a olejem. Vinutí transformátoru se rychle zahřívá při téměř konstantní teplotě oleje. Na průběh teplotního procesu při přechodném stavu mají vliv časové konstanty jednotlivých částí transformátoru. Časová konstanta oteplování vinutí transformátorů bývá asi 5 min, časová konstanta oteplování oleje asi 3 hodiny. Tyto skutečnosti musí být respektovány při návrhu a nařízení ochran, které mají za úkol chránit transformátor při krátkodobých velkých přetíženích i při dlouhodobých přetíženích. Je zřejmé, že z tohoto hlediska je nutné respektovat ustálený teplotní režim transformátoru a sledovat změny zatížení. Tomuto požadavku nejlépe vyhovuje kombinace tepelného čidla, které sleduje teplotu chladicího oleje pod víkem transformátoru a proudového čidla, které sleduje rychlé změny zatížení.

Paralelní chod transformátorů

Paralelní spolupráce transformátorů se používá v případě, kdy nestačí pro napájení určitého provozu výkon jednoho transformátoru. Paralelní spojení transformátorů znamená, že transformátory jsou jak na vstupní straně, tak i na výstupní straně připojeny na společné přípojnice nebo na společnou síť.

Při paralelním chodu transformátorů je nutné dodržet tyto základní podmínky :

- Stejná jmenovitá napětí na primární i sekundární straně transformátorů paralelně spojených.
- Stejný převod napětí naprázdno. Při odchylce převodu větší než 0,5 % vznikají mezi transformátory vyrovnávací proudy; při chodu naprázdno teče vyrovnávací proud od výstupní strany transformátoru s větším výstupním napětím do transformátoru s menším výstupním napětím. (Od transformátoru s menším převodem k transformátoru s větším převodem). Při zatížení má nestejný převod za následek nestejně zatížení transformátorů a to tak, že transformátor s větším výstupním napětím (s menším převodem) je vždy více zatížen.
- Stejný úhel natočení fázorů napětí - stejné hodinové číslo. Při nesplnění této podmínky není bez dalších opatření paralelní chod transformátorů zpravidla vůbec možný.
- Stejně napětí nakrátko. Dovolena odchylka hodnoty napětí nakrátko je $\pm 10\%$. Není-li tato podmínka splněna nevzniká sice vyrovnávací proud při chodu naprázdno, ale při zatížení přebírají transformátory s menším napětím nakrátko větší část zatížení a naopak. Spojí-li se paralelně dva transformátory s různými jmenovitými výkony S_{n1} a S_{n2} a s různými napětími nakrátko u_{k1} a u_{k2} a jestliže je $u_{k1} < u_{k2}$, pak se rozdělí zatížení vždy tak, aby na obou paralelně pracujících transformátorech byl stejný úbytek napětí. Dosáhne-li transformátor s menším napětím nakrátko u_{k1} svého jmenovitého výkonu S_{n1} , odpovídá příslušnému úbytku napětí zatížení druhého transformátoru snížené v poměru $\frac{u_{k1}}{u_{k2}}$.

Nemá-li být transformátor o výkonu S_{n1} přetěžován, pak lze oba transformátory při paralelním provozu zatížit celkovým výkonem :

$$S_{cp} = S_{n1} + S_{n2} \cdot \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \quad (2.134)$$

Při splnění podmínky $u_{k1} < u_{k2}$ platí :

$$S_{cp} < S_c = S_{n1} + S_{n2} \quad (2.135)$$

kde :

S_c ... je součet jmenovitých výkonů obou transformátorů

Poměr obou součtových výkonů pak udává využití skupiny paralelně pracujících transformátorů :

$$\kappa = \frac{S_{cp}}{S_c} \quad (2.136)$$

S ohledem na dobré využití skupiny paralelně pracujících transformátorů je výhodné, aby transformátor s větším napětím nakrátko měl menší jmenovitý výkon. Poměr jmenovitých výkonů paralelně pracujících transformátorů se má pokud možno rovnat jedné, v krajním případě nemá přestoupit poměr 1 : 3. Využití skupiny má být minimálně $\kappa = 0,95$.

3.1. Elektrické ochrany bloku - alternátor, transformátor blokový, transformátor vlastní spotřeby

Elektrické stroje a zařízení výrobního elektrárenského bloku tvoří celek v němž jsou jednotlivé stroje spojeny nejen galvanickými vazbami, ale i vazbami danými požadavky na zabezpečení v normálních podmínkách i při mimořádných nebo poruchových stavech. Proto je nutné řešit otázku ochrany a zabezpečovacích systémů komplexně tak, aby byly zachyceny a likvidovány všechny druhy poruch. Každý stroj a zařízení je vyzbrojeno svými autonomními ochrany, které působí selektivně při výskytu poruchy v chráněném objektu. Dále jsou na strojích a zařízeních instalovány společné ochrany pro dva nebo více objektů tak, aby bylo zajištěno chránění větších celků včetně spojovacích cest a související elektrické výzbroje. Důležitou otázkou návrhu ochrany je koordinace činnosti ochrany navzájem, dále jejich součinnost se strojními ochrany a také soulad mezi činností regulačních prvků a ochrany. Při návrhu ochrany elektrických strojů a zařízení v elektrárně je nutné vytvářet podmínky pro záložní působení ochrany bloku ve vztahu k přenosovým vedením a nejbližší elektrické stanici, do které je vyveden výkon elektrárny.

V následujících kapitolách budou proto probrány základní typy ochrany, které se používají všeobecně pro různé stroje a zařízení a dále pak ochrany, specifické pro určité stroje a zařízení nebo ochrany speciálně určené pro jednotlivé poruchy.

Nadproudé ochrany

Nadproudé ochrany jsou nejrozšířenějším typem elektrických ochrany a jsou používány téměř u všech strojů a zařízení - alternátorů, transformátorů, elektrických motorů, vedení a dalších prvků. Nadproudá ochrana reaguje na zvýšení proudu v chráněném objektu, které může vzniknout buď v důsledku přetížení nebo při zkratu. Přetížení a zkrat se obvykle liší hodnotou nadproudu vyjádřenou násobkem jmenovité hodnoty proudu. Přetížení, které způsobí zvýšení proudu ve vinutí strojů a tím i nadměrné oteplení má za následek podstatně rychlejší stárnutí izolace.

Charakteristika ochrany by měla mít přibližně stejný tvar, jako křivka určující dovolené zatížení chráněného objektu. Ochrana proti přetížení musí proto sledovat stav blízký jmenovitému zatížení a hodnotu, při které působí, lze zhruba vymežit $1,2 I_n$ až $1,6 I_n$ podle druhu chráněného zařízení. Časové působení, jak již bylo uvedeno, by mělo být v souladu s tepelným režimem chráněného objektu. Nadproudá ochrana při zkratu musí, vedle zjištění, že došlo ke zvýšení sledované hodnoty proudu, určit v jakém úseku porucha vznikla. Tento stupeň selektivity je zajišťován odstupňovaným časovým působením nadproudých ochran, nebo kombinací nadproudých článků a podpěťových článků. Hodnota nastavení nadproudé zkratové ochrany se zhruba pohybuje od $4 I_n$ do $6 I_n$. Časové působení může být velmi rychlé nebo zpožděné podle okolností, které ovlivňují součinnost působení ochran. Velmi často se u jednoho zařízení objevuje několikastupňové vybavení nadproudou ochranou a to :

- ochrana proti přetížení
- ochrana zkratová
- ochrana zkratová s podpěťovým blokováním.

Podle důležitosti zařízení a podle způsobu zapojení nulového bodu se používají nadproudá relé s jedním, dvěma nebo třemi nadproudými články.

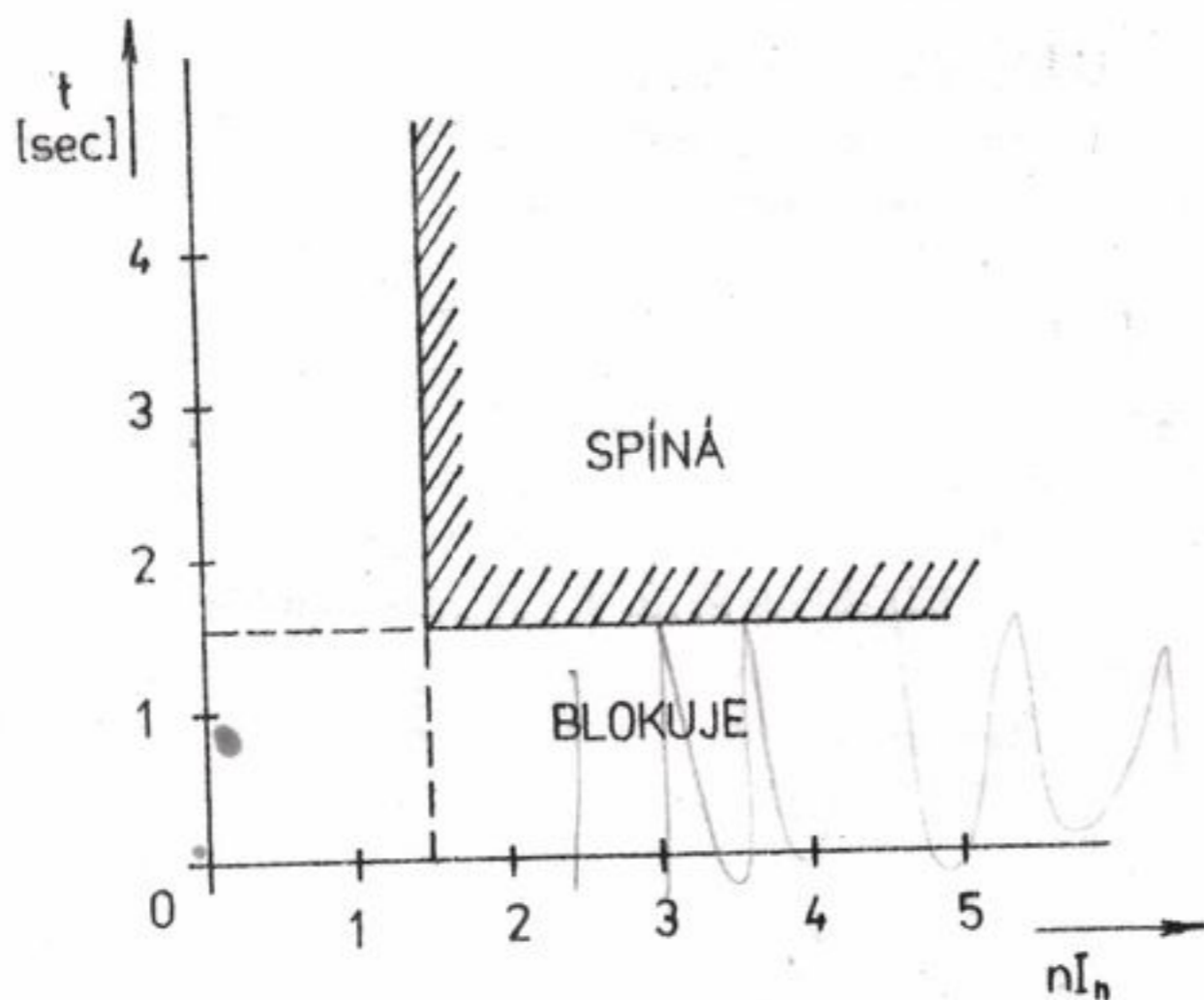
Podle charakteristik působení lze rozdělit nadproudé ochrany na tyto skupiny :

- časově nezávislé
- časově závislé
- časově polozávislé
- proudové tepelné články

Toto rozdělení respektuje princip působení nadproudé ochrany a to vztah mezi vypínacím časem a hodnotou nadproudu bez ohledu na konstrukční provedení vlastní ochrany.

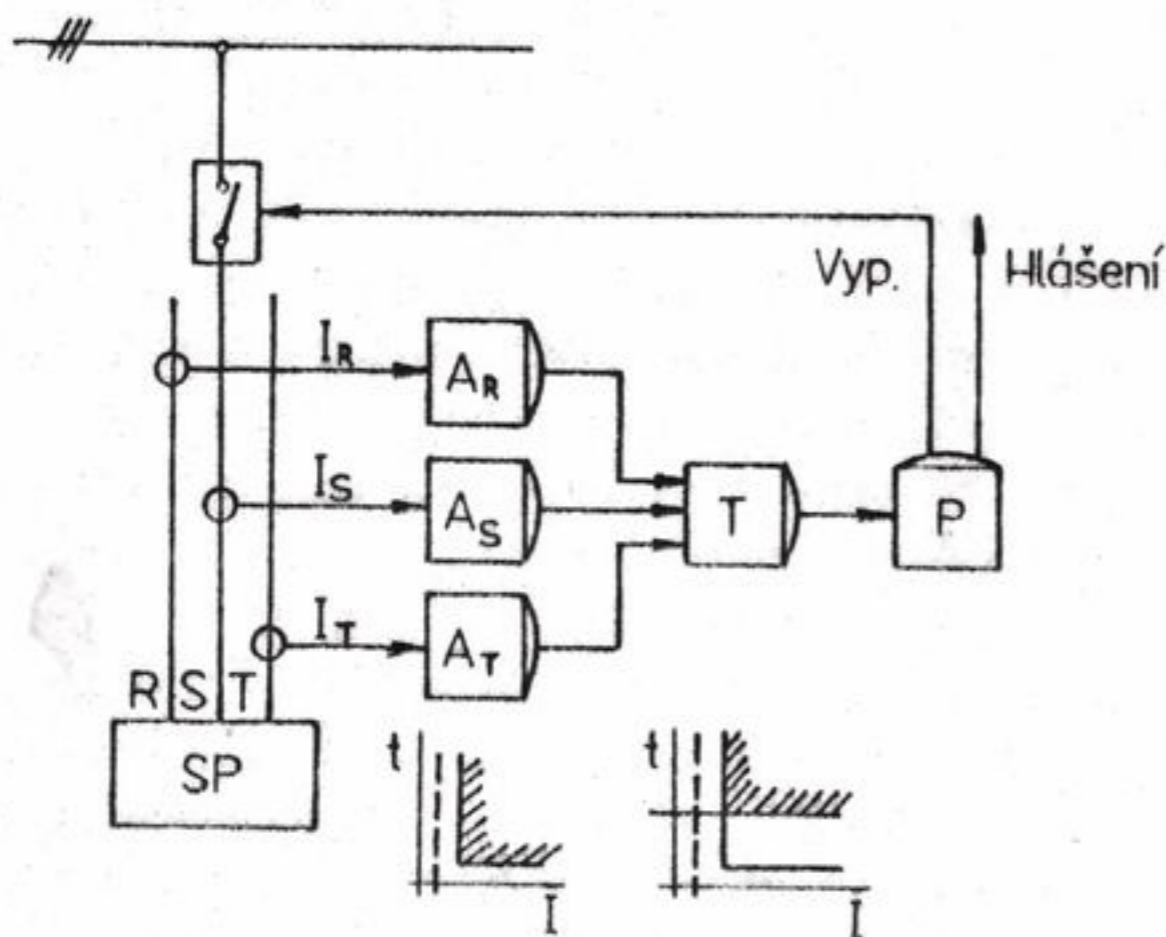
Nadproudá ochrana časově nezávislá

Tento typ ochrany používáme pro jištění elektrických strojů a zařízení při přetížení a zkratech a to tam, kde vyžadujeme přesné působení nadproudé^{ho} časového článku za účelem selektivního chránění. Vypínací čas je nezávislý na velikosti nadproudu a lze jej v určitých mezích libovolně nastavit. Trvá-li poruchový stav delší dobu, než je nastavená časová hodnota, pak je vydán vypínací impuls. Nastavení velikosti nadproudu, při kterém ochrana nabíhá je rovněž v daných mezích libovolné, jak vyplývá z obr. 3.1.



Tyto vlastnosti spolu s dostatečnou přesností funkce obou článků dávají možnost vytvoření souladu činnosti nadproudých ochran v navazujících (sousedních) částech a prvcích ES.

Obr. 3.1. Charakteristika nadproudé ochrany časově nezávislé



Vnitřní uspořádání nadproudé ochrany časově nezávislé s třemi články nadproudými je na obr.3.2. Realizace nadproudých článků a článků časového je možná buď na principu elektromechanickém, nebo elektronickém (statickém). Z obr. 3.2. je dále vidět, že časový článek je jeden, společný pro všechny nadproudé články a že vedle vypínacího impulsu je nutné hlásit výskyt poruchy pro obsluhu daného zařízení

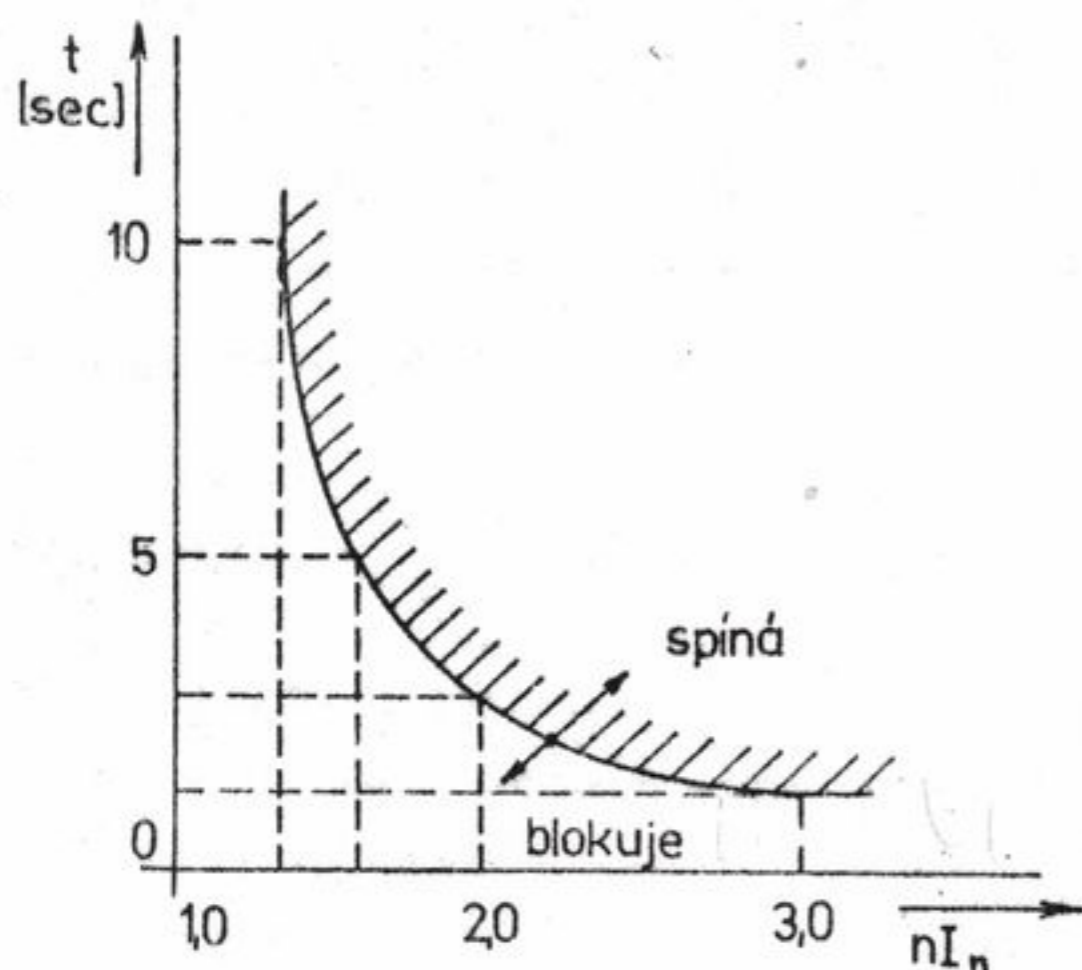
Obr. 3.2. Nadproudá ochrana časově nezávislá

Nadproudá ochrana časově závislá

Základním úkolem těchto relé je ochrana motorů, transformátorů a jiných spotřebičů proti nadměrnému oteplení při přetížení, případně i při zkratu. Tyto ochrany zpracovávají veličinu proudu, která prochází chráněným objektem a svojí charakteristikou se přibližují tepelné charakteristice chráněného objektu.

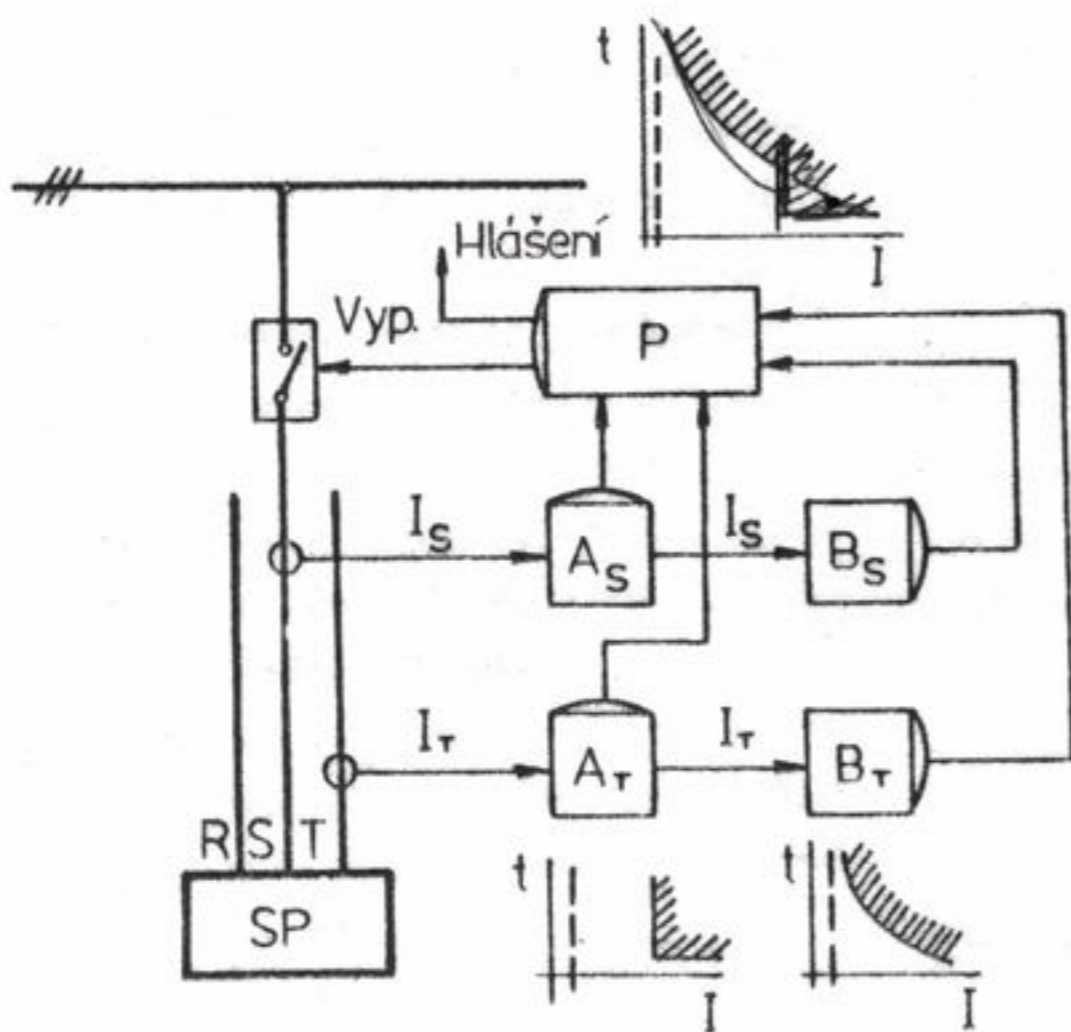
K těmto typům patří např. relé s bimetalem, otočné systémy typu Ferrarisova kotouče apod. Nevýhodou tohoto uspořádání je skutečnost, že chráněný objekt je obvykle složitá tepelná soustava s více časovými konstantami. Závislé ochrany mají pouze jednu časovou konstantu, ve srovnání s chráněným objektem značně kratší.

Ochrana musí také respektovat výchozí tepelný stav, tzn. zamezit nedovolenému oteplování při opakovaném přetěžování. To lze částečně dosáhnout na příklad u bimetalu, který je předchozím stavem přehřátý stejně jako chráněný stroj.



Na obr. 3.3. je naznačena vypínací charakteristika závislé nadproudé ochrany. Z obr. 3.3. je patrné, že při velkém přetížení je vypínací čas krátký a naopak. Často se tyto ochrany doplňují rychlým článkem zkratovým, který tak chrání nejen vlastní objekt, ale svým rychlým působením i samotnou ochranu.

Obr. 3.3. Charakteristika nadproudé ochrany časově závislé

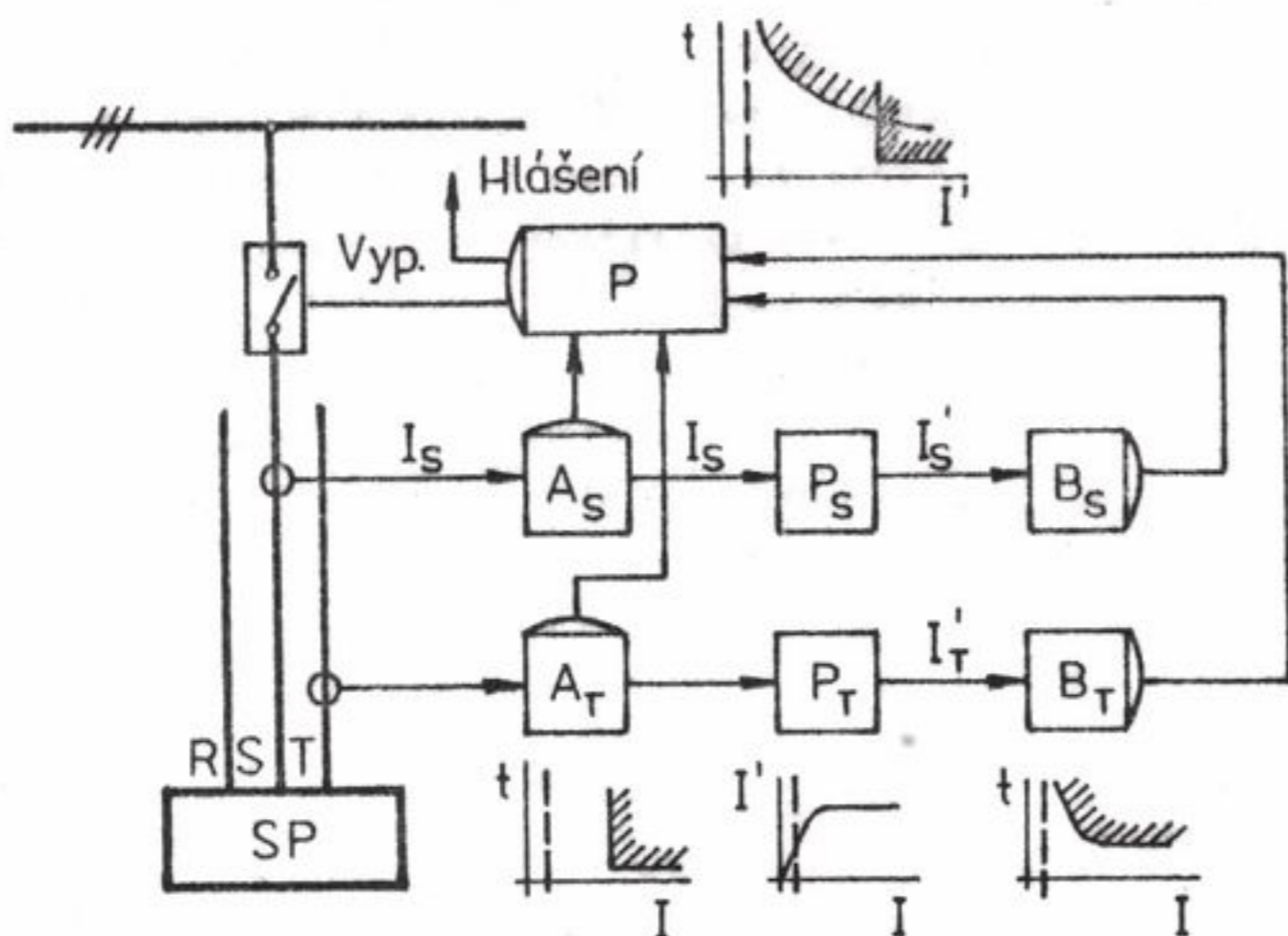


Na obr. 3.4. je zásadní zapojení časově závislé ochrany, která je kombinovaná s rychlým zkratovým článkem. Měření proudu je provedeno ve dvou fázích S; T. Nezávislé zkratové články jsou označeny A_S ; A_T , závislé - měřicí články B_S ; B_T , pomocné relé P dává vypínací impuls a signalizační impuls. SP je chráněný spotřebič.

Obr. 3.4. Nadproudá ochrana časově závislá

Nadproudé ochrany s charakteristikou polozávislou

Samotná velikost nadproudu není spolehlivým měřítkem stupně ohrožení chráněného objektu. Tak např. při rozběhu asynchronního motoru trvá přetížení podle druhu zatížení několik sekund. Velikost rozběhového proudu je nepřímo úměrná reaktanci motoru nakrátko a udává se násobkem jmenovitého proudu motoru. Tato hodnota se pohybuje mezi 4 ÷ 8 násobkem I_n podle velikosti a druhu motoru. Proto se charakteristika závislé ochrany pro tento režim upravuje tak, aby byla od určité meze (asi 2 ÷ 3 násobek I_n) nezávislá. S touto charakteristikou pak dosahujeme snazší přizpůsobení charakteristiky motoru a ochrany. Také polozávislé ochrany bývají doplněny rychlovypínacím elektromagnetickým článkem, který působí při zkratech. Chráníme tak nejen vlastní objekt, ale také přívodní kabel. Zásadní schéma polozávislé ochrany je na obr. 3.5. Od ochrany závislé se liší omezovací členy P_S a P_T , které měřenou veličinu proudu upravují před vstupem do měřicích článků B_S ; B_T .



Obr. 3.5. Nadproudá ochrana časově polozávislá

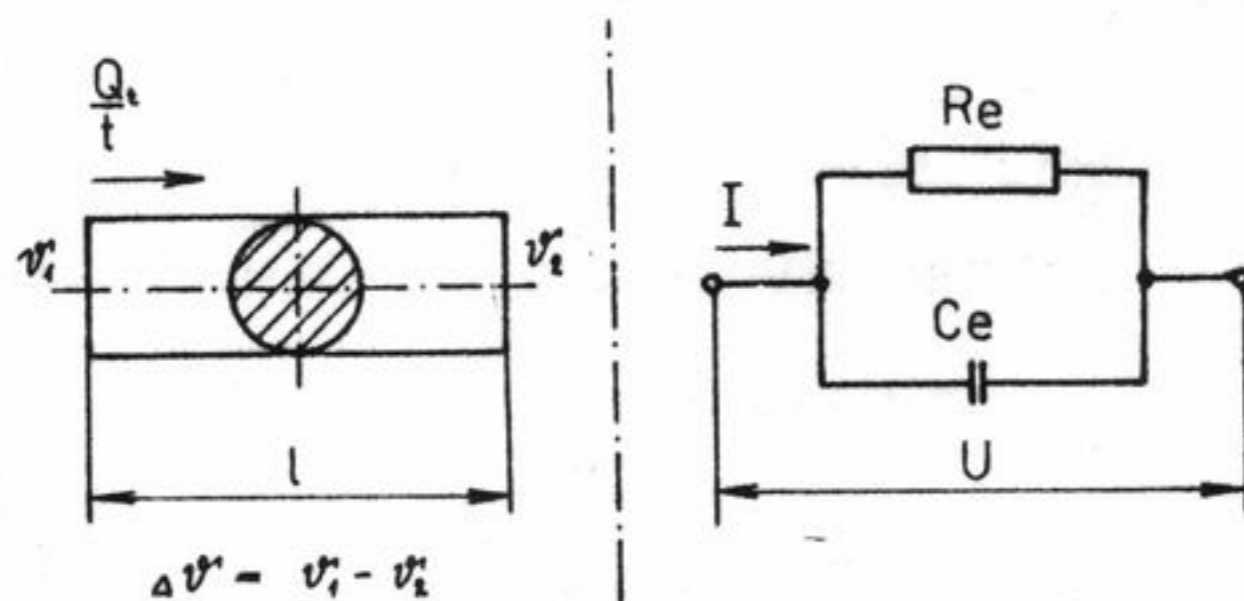
Proudové tepelné články

Dosud uvedené ochrany se snaží napodobit elektrický stroj tím, že topné vinutí protékané proudem úměrným proudu motoru ohřívá bimetál, který působí na kontaktní zařízení. Nevýhodou tohoto systému je, že se ohřívá a chladne stejně rychle a nerespektuje vliv chlazení. Časová konstanta těchto systémů bývá malá (asi 2 minuty) v porovnání s chráněným strojem.

Aby tepelná ochrana respektovala specifické podmínky chlazení každého stroje je třeba umístit tepelný článek vyhříváný proudem motoru nebo transformátoru do chladícího média stroje. U transformátoru se tato termokopie umísťuje do oleje pod víko, u motorů je vhodné umístit ji přímo do vyfukovaného chladícího vzduchu. V současné době se naskytá možnost realizovat tranzistorovou ochranu motorů nebo transformátorů na podobném principu tepelného modelu, který může být přesnějším obrazem chráněného motoru než bimetál. K zobrazení tepelných jevů v objektu poslouží analogie s elektrickými jevy. Náhradní schema lze jednoduše realizovat paralelním členem RC, kde kondenzátor je nabíjen proudem úměrným průchozímu proudu. Proud nabíjecí je analogií tepelného toku, napětí na kondenzátoru pak odpovídá oteplení chráněného stroje. Elektrické veličiny, které odpovídají tepelnému stavu chráněného objektu jsou přehledně uvedeny v tab. 6. Ochrana obsahuje klopný obvod, který spíná po dosažení kritického napětí na kondenzátoru.

| Chráněný objekt | | Proudový článek ochrany | |
|------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|
| Množství tepla | Q_t | Q_e | elektrický náboj |
| Tepelná kapacita | C_t | C_e | elektrická kapacita |
| Tepelný odpor | R_t | R_e | elektrický odpor |
| Rozdíl teplot | $\Delta \vartheta$ | U | elektrické napětí |
| Tepelný tok | $\frac{Q_t}{t}$ | I | elektrický proud |

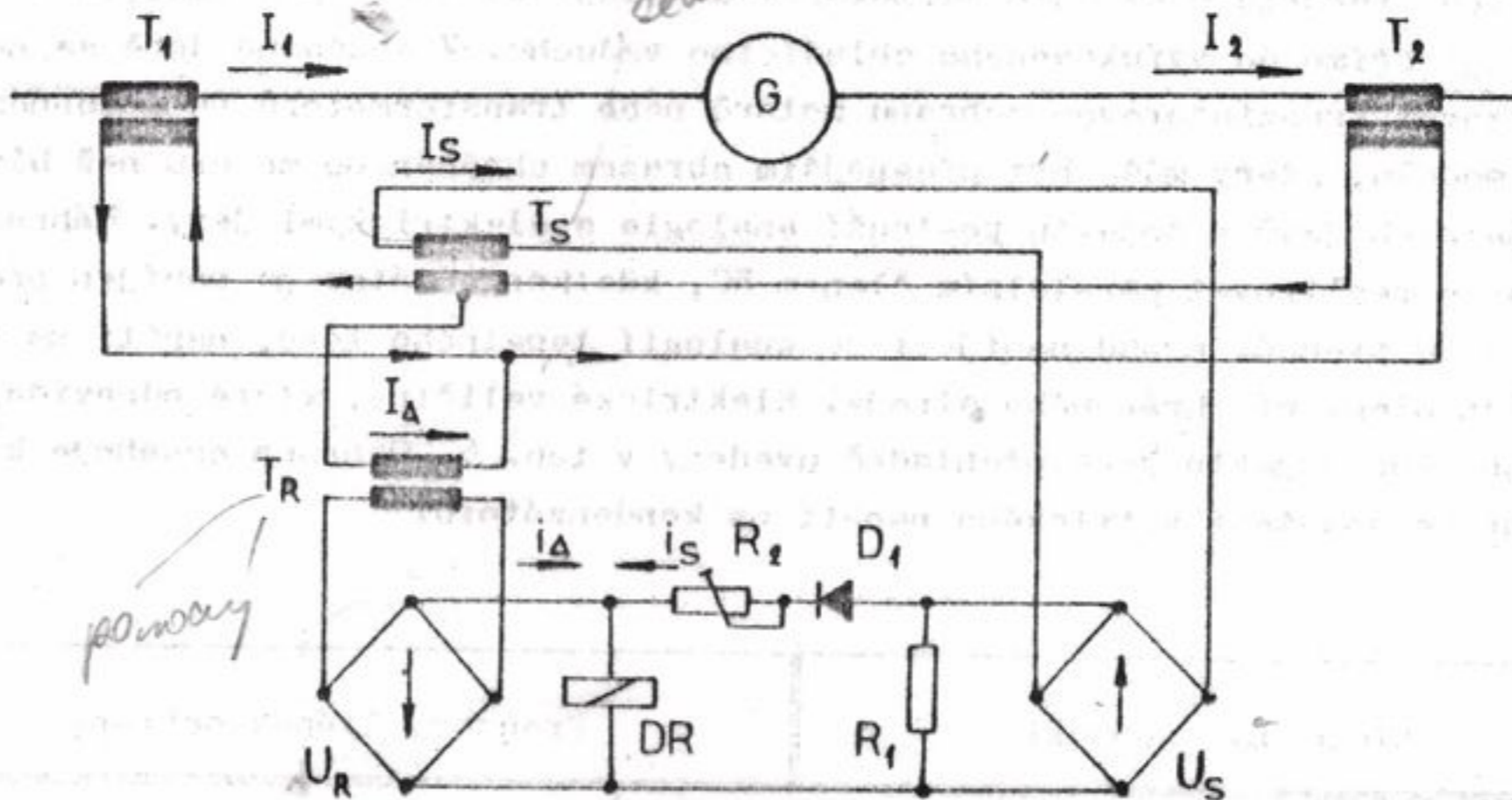
Tab. 6. Analogie tepelných a elektrických veličin



Obr. 3.6. Chráněný objekt a tepelný model

Ochrana rozdílová (diferenciální)

Rozdílová ochrana chrání stroje a zařízení při mezifázových a jednofázových zkratech, které se vyskytnou v chráněném úseku. Úsek chránění je vymezen transformátory proudu, které jsou umístěny před chráněným objektem a za ním. Rozdílová ochrana pracuje tak, že srovnává okamžité hodnoty proudu každé fáze, které do objektu vstupují s hodnotami proudu, které z chráněného objektu vystupují. Na obr. 3.7. je znázorněna rozdílová ochrana alternátoru, kde T_1 představuje transformátory proudu mezi uzlem alternátoru a začátkem vinutí, transformátor T_2 pak přístrojové transformátory proudu na výstupu alternátoru.



Obr. 3.7. Rozdílová ochrana s procentní stabilizací

Při normálním bezporuchovém provozu jsou proudy na vstupu I_1 i na výstupu I_2 stejné, takže diferenciální větví vycházející ze středu sekundárního vinutí pomocného transformátoru T_S neprochází žádný proud. Při poruše uvnitř chráněného úseku se poruší proudová rovnováha, rozdíl proudu I_{Δ} teče diferenciální větví můstku, tvořeného spojením sekundárních vinutí přístrojových transformátorů proudu T_1 a T_2 . Po transformaci na pomocném transformátoru T_2 a usměrnění je tato hodnota stejnosměrného proudu vedena na měřící relé deprezského systému DR. Rozdílová ochrana musí být stabilizována proti chybnému působení při různých provozních stavech nebo poruchách mimo chráněný objekt. Stabilizace je úměrná proudu procházejícímu chráněným objektem. Veličina odvozená od průchozího proudu je snímána na sekundárním transformátoru T_S a po usměrnění působí v opačném smyslu než veličina odvozená od rozdílového proudu. Tímto způsobem je ochrana stabilizována proti nesprávnému působení zvláště při větších průchozích proudech.

Nepříznivé vlivy, které by mohly způsobit nesprávnou funkci rozdílové ochrany jsou :

Nevyrovnané sekundární proudy přístrojových transformátorů proudu

Proudy na sekundární straně transformátorů proudu musí být při bezporuchovém stavu chráněného objektu stejné co do velikosti i fáze.

Oba transformátory proudu musí mít stejnou charakteristiku i v oblasti velkých nadproudů, aby se při zkratu mimo chráněný úsek neobjevil rozdílový proud I_{Δ} , který by ochranu uvedl nesprávně k činnosti. Zatímco dříve postačovalo pro návrh těchto transformátorů proudu zvolit průřez jejich magnetických obvodů podle požadovaného nadproudového

čísla, ukazuje se, že tento postup je nevyhovující. Při přechodových dějích dochází k přesyčení ferromagnetika stejnosměrnou složkou, což vede ke zkreslení přenosu primární veličiny na sekundární stranu a možné nesprávné funkci diferenciální ochrany. Tento jev nastává zejména v blízkosti alternátorů velkých jednotkových výkonů, kde doznívání stejnosměrné složky probíhá s velkou časovou konstantou ($T_a = 50$ až 300 ms).

Prakticky existují dvě řešení, která vyhovují zvýšeným požadavkům na transformátory proudu pro rozdílové ochrany. Buď je zvolen bohatě dimenzovaný magnetický obvod, nebo se volí magnetický obvod se vzduchovou mezerou.

Nadproudé číslo těchto transformátorů proudu je pak 100 i více.

Nestejně převody transformátorů proudu

Transformátory proudu se vyrábějí v typové řadě, ze které můžeme vybrat pro daný případ typy, které jsou nejbližší jmenovité hodnotě proudu chráněného zařízení. Protože se tyto hodnoty zcela neshodují, vzniká na sekundární straně transformátorů proudu diference, která musí být vyrovnána buď vyšší stabilizací ochrany, nebo zařízením pomocných transformátorů proudu. Ty mohou mít ještě další úkol: vyrovnání nestejného fázového natočení vektorů proudu při chránění transformátorů. Vzhledem k tomu, že pomocné transformátory proudu zvětšují ohmický odpor v obvodu zátěže, se jejich používání nedoporučuje.

Vliv regulace napětí transformátoru

Vlivem regulace napětí se mění převod transformátoru a tím i hodnoty proudu na primární a sekundární straně. Tuto diferenci nelze jednoduše kompenzovat a musí být respektována zvýšenou stabilizací vlastní rozdílové ochrany.

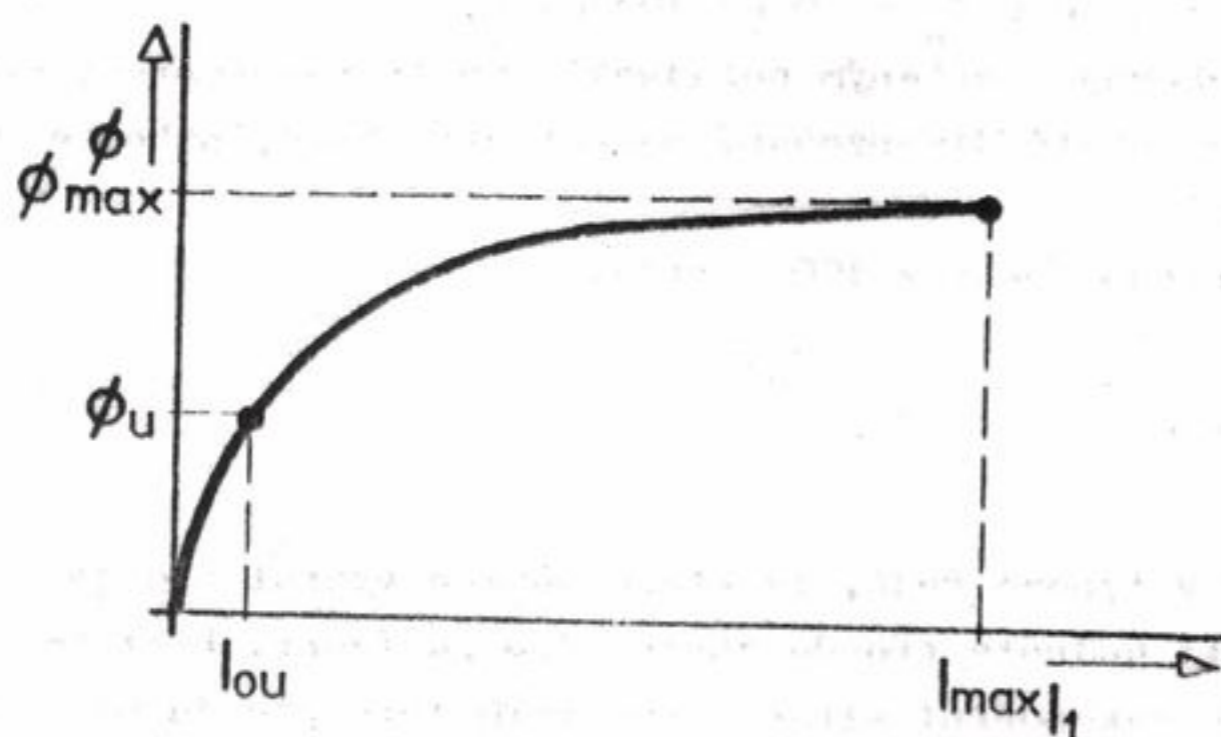
Zapínání transformátoru

Při zapnutí transformátoru naprázdno může nárazový magnetizační proud způsobit chybné zapůsobení rozdílové ochrany. Velikost magnetizačního proudu závisí na okamžiku zapnutí a na zbytkové remanenci jádra, danou předchozím stavem transformátoru. K obdobnému přechodnému ději může dojít u transformátoru také po vypnutí zkratu při kterém dojde ke zhroucení napětí. Proud zapínacího rázu má nesinusový průběh a obsahuje navíc přechodnou stejnosměrnou složku. Největší hodnota proudu se vyvine při zapnutí transformátoru naprázdno v okamžiku, kdy napětí prochází nulou.

Při přechodném ději po zapnutí transformátoru se zvětšuje magnetický tok od nuly až na hodnotu $2 \Phi_u$, neboť se superponuje střídavá složka odpovídající toku Φ_u (ustálená hodnota) a stejnosměrná složka Φ_a stejné velikosti jako Φ_u .

Na obr. 3.8. je závislost mezi magnetickým tokem a magnetizačním proudem ze které vyplývá, že maximální amplituda proudu může dosahovat hodnotu $(50 \div 80) I_{0n}$ pro transformátory středních výkonů a $(100 \div 120) I_{0n}$ pro velké transformátory s jádry vyrobenými z orientovaných plechů se značným využitím železa.

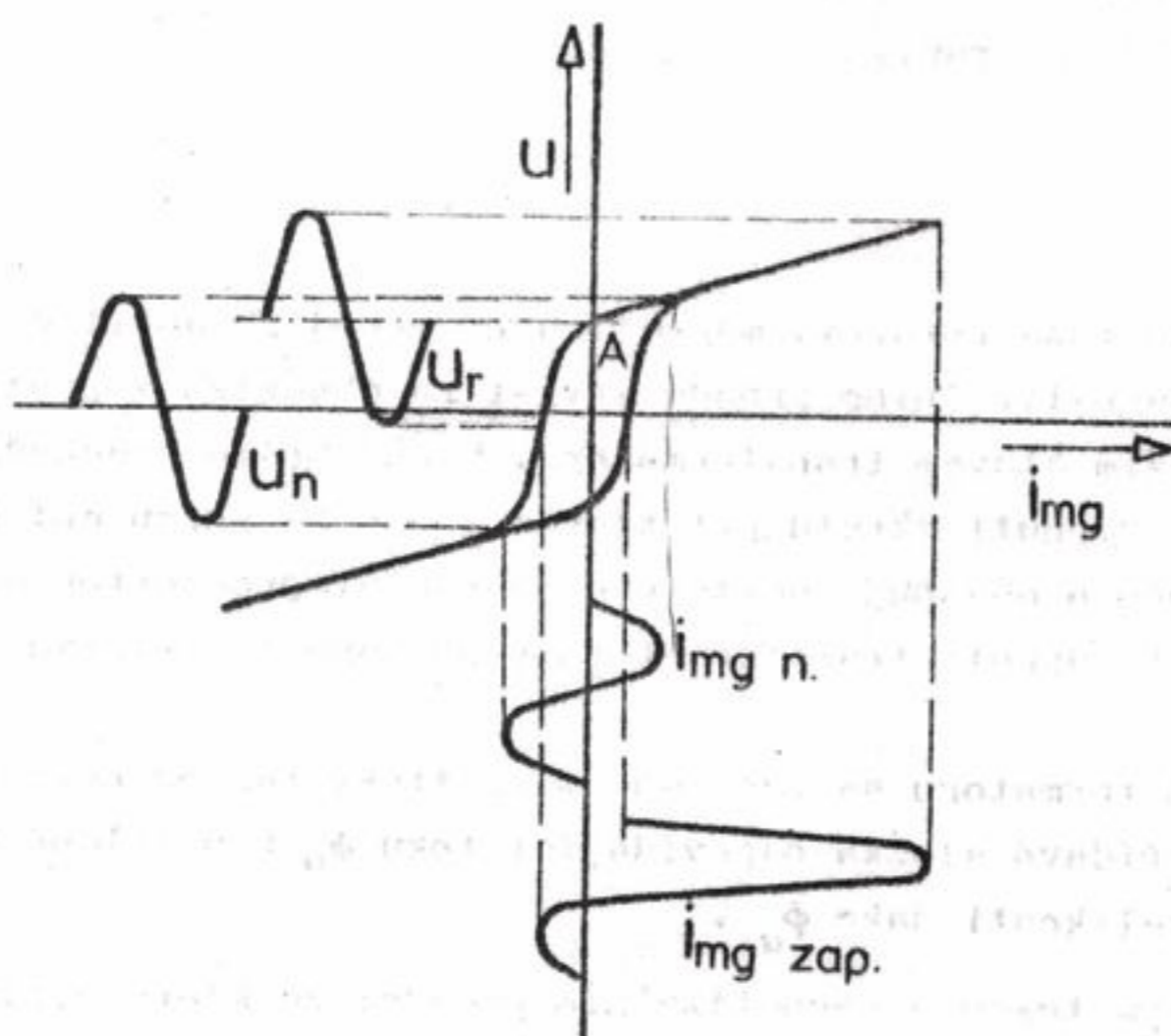
I_{0n} je ustálený magnetizační proud transformátoru, který bývá 1 až 5 % I_n . Nárazový magnetizační proud bez uvažování vlivu remanence dosahuje hodnot $0,5$ a $6 I_n$.



Obr. 3.8. Závislost $I_1 = f(\Phi)$

Remanentní magnetismus zvětšuje nebo zmenšuje podle své polarizace velikost magnetického toku při zapnutí transformátoru naprázdno.

Průběh zapínacího magnetizačního proudu při zbytkové remanenci odpovídající bodu A, kdy dojde k vývinu největší hodnoty proudu je znázorněn na obr. 3.9.



Na obr. 3.9. značí :

u_r ... remanentní napětí

u_n ... průběh napětí v ustáleném stavu

$i_{mg\ zap}$.. zapínací magnetizační proud

$i_{mg\ n}$ magnetizační proud v ustáleném stavu

Obr. 3.9. Určení velikosti $I_{mg\ max}$

Při zapnutí se sinusovka napětí nepohybuje souměrně kolem počátku, po dobu několika period je provoz nesouměrný kolem bodu odpovídajícímu zbytkové remanenci. Tak dochází k podstatnému zvětšení magnetizačního proudu vlivem zbytkového nasycení jádra.

U velkých transformátorů je proudový zapínací náraz při uvažování stejnosměrné složky proudu a zbytkové remanence $I_{mg\ zap.} = 10 I_n$.

Chránění trojvlnového transformátoru. (Tříbodová rozdílová ochrana)

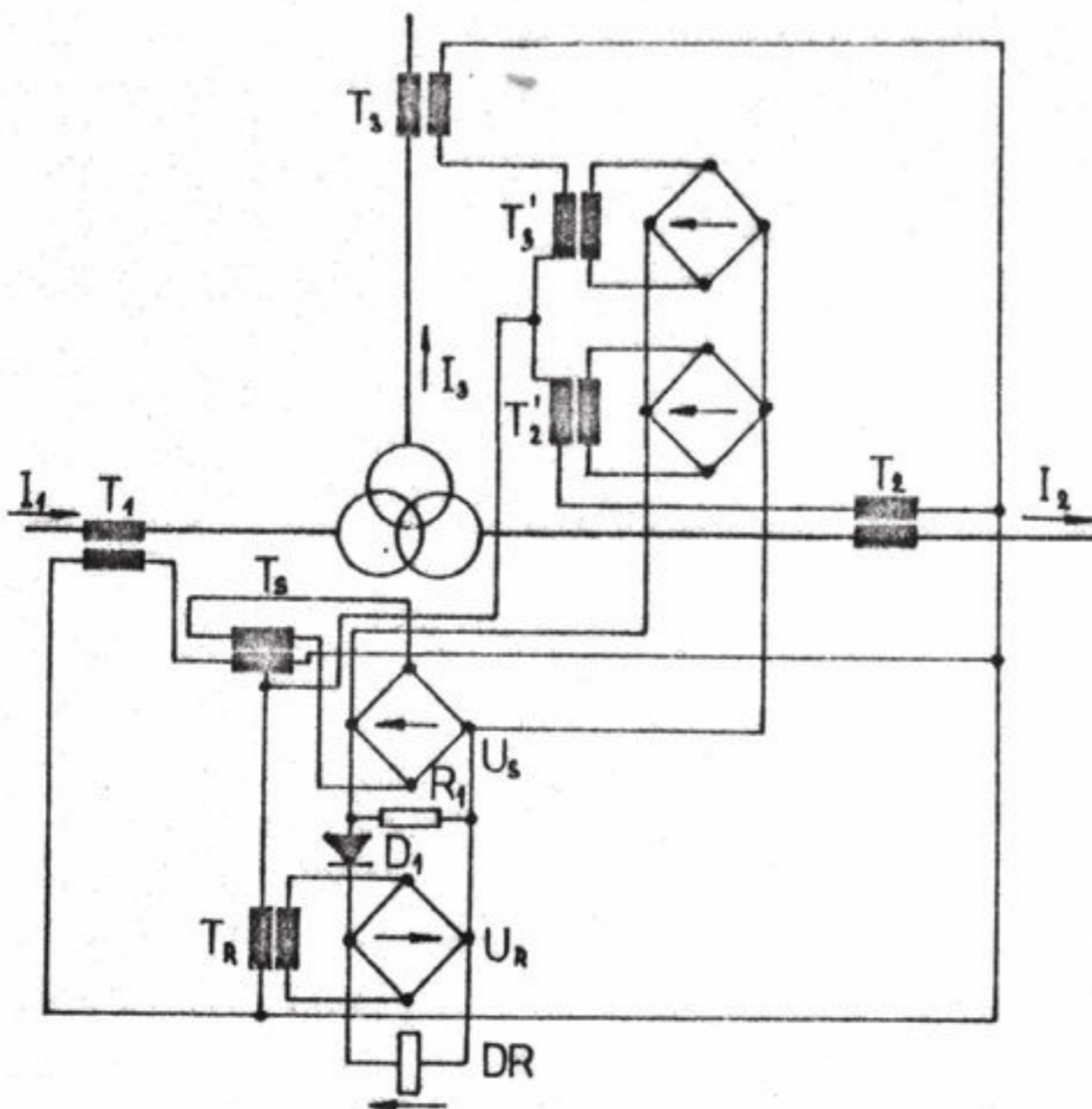
Má-li rozdílová ochrana chránit objekt s více než dvěma vývody, je třeba sečíst výstupní (nebo vstupní) proudy tak, aby byla vytvořena patřičná rovnováha. ($I_1 = I_2 + I_3$). Schema zapojení (obr. 3.10.) je obdobné jako u dvoubodové rozdílové ochrany, navíc musí být přičítán příspěvek od proudu I_3 . Diference proudu vznikající při poruše je zde navíc vedena ze středu pomocných transformátorů proudu T'_2 a T'_3 . Z těchto transformátorů získáváme také příspěvek průchozího proudu větví 2 a 3, který stabilizuje ochranu.

Zapojení rozdílových ochran

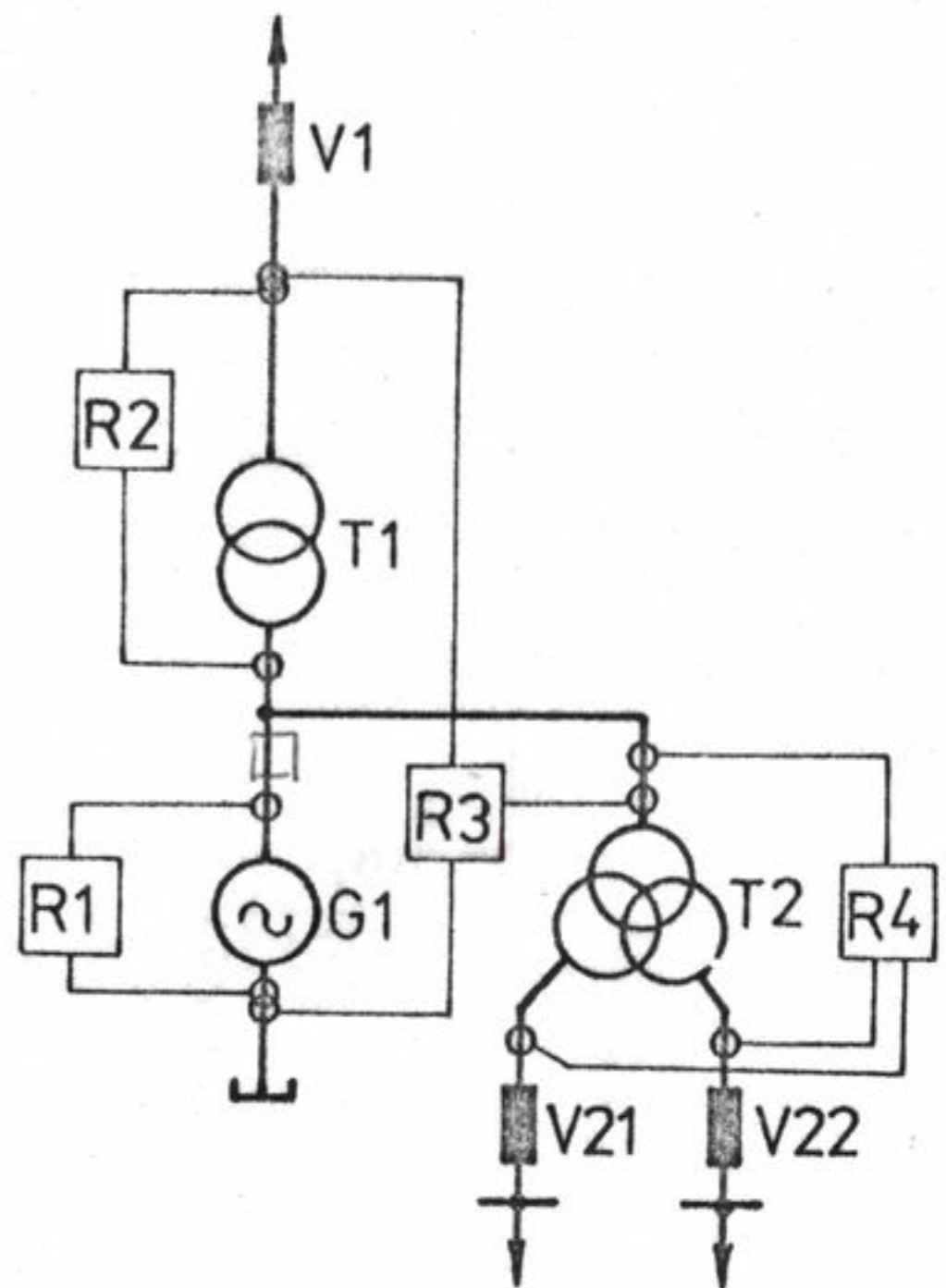
Na obr. 3.11 a) je základní schema bloku alternátor - transformátor s napájením vlastní spotřeby transformátorem se dvěma vinutími na sekundární straně. Alternátor G_1 a transformátor bloku T_1 jsou chráněny rozdílovými ochranami $R1$ a $R2$ ve dvoubodovém zapojení, oba stroje jsou pak společně chráněny tříbodovou rozdílovou ochranou $R3$, která chrání ještě část zapouzdřených vodičů na vývodu z alternátoru a odbočku k transformátoru vlastní spotřeby. Transformátor vlastní spotřeby je pak chráněn vlastní rozdílovou ochranou $R4$ v tříbodovém zapojení.

U bloků, kde je vypínač mezi alternátorem a blokovým transformátorem je nutné chránit vedle samotného alternátoru (ochranou $R1$) ještě úsek obsahující vypínač až po transformátory proudu, které přísluší tříbodové ochraně $R3$, jak je naznačeno na obr. 3.11 b).

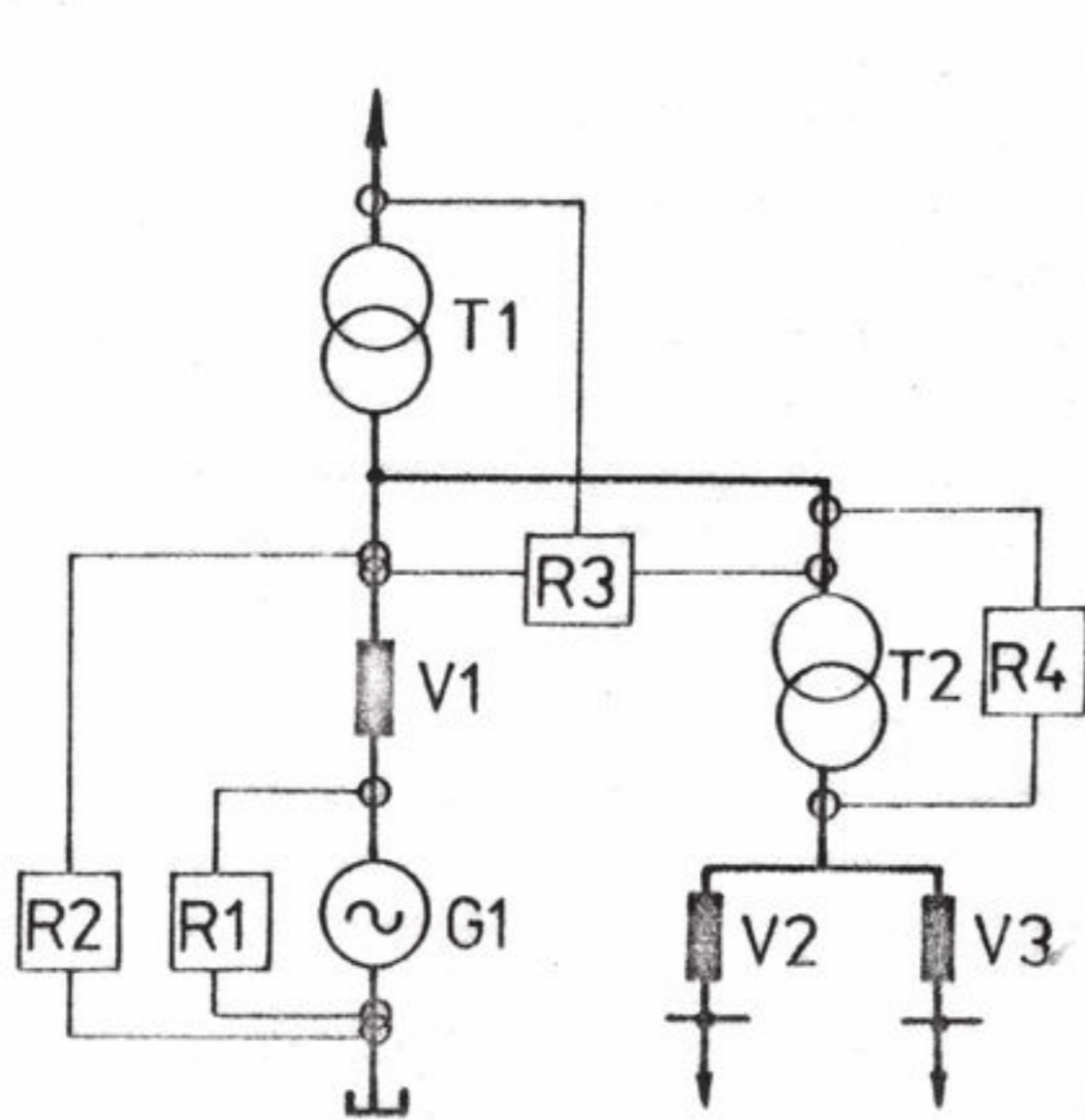
Obdobné je pak zapojení rozdílových ochran pro alternátor s vypínačem mezi alternátorem a blokovým transformátorem, kde je napájení vlastní spotřeby bloku zajištěno trojvlnovým transformátorem podle obr. 3.11c).



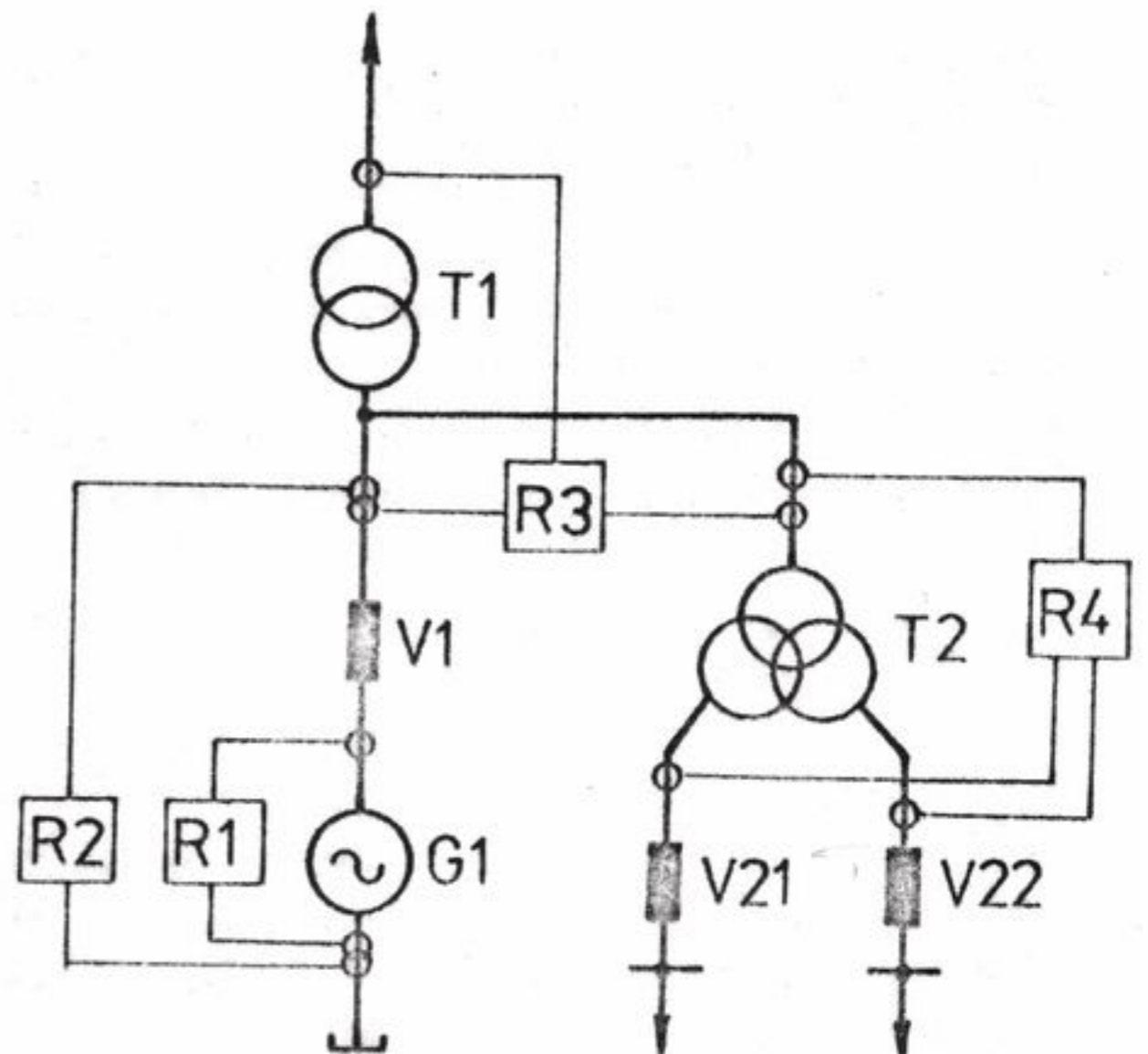
Obr. 3.10. Tříbodová rozdílová ochrana



Obr. 3.11 a) Zapojení rozdílových ochran bloku

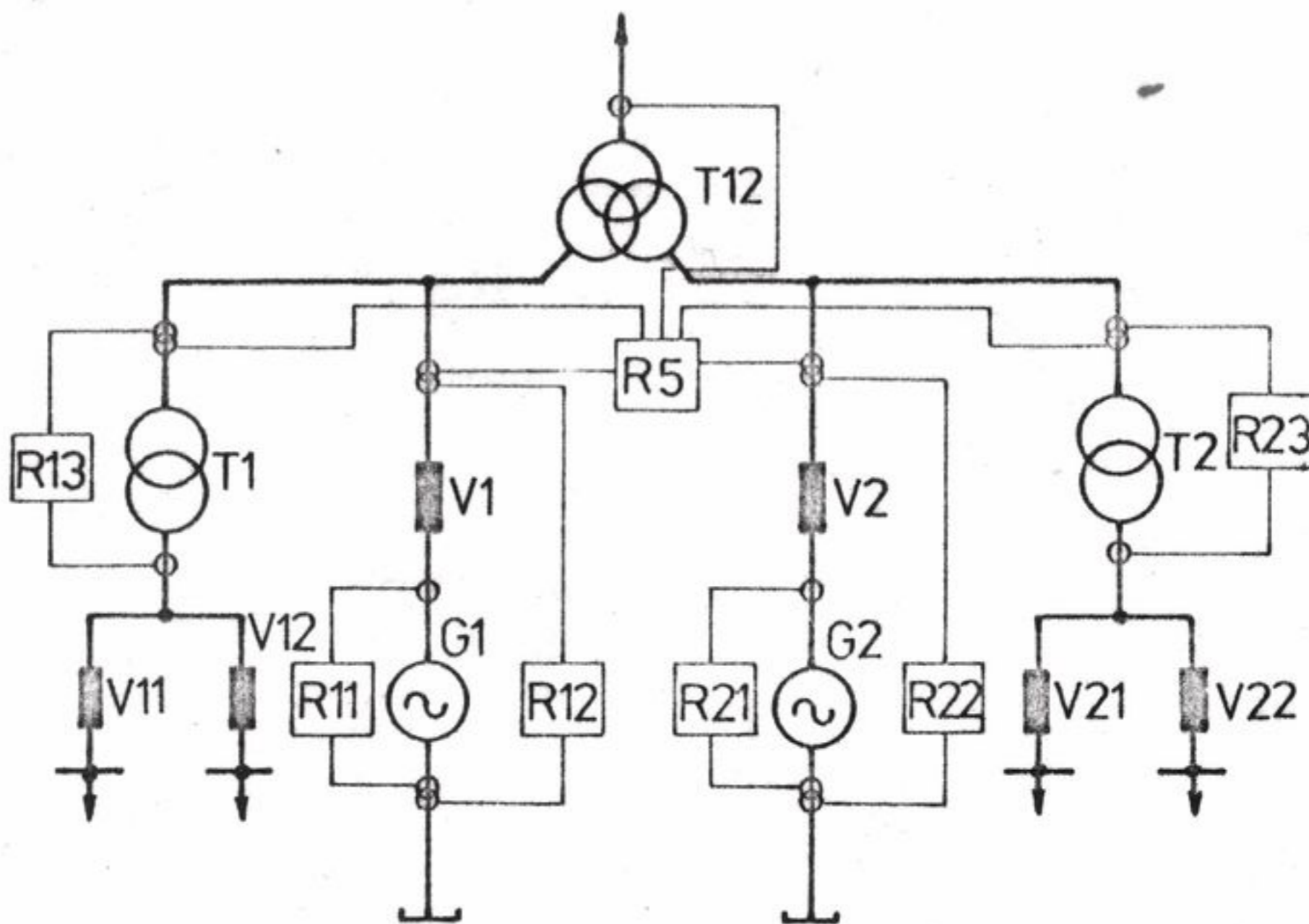


Obr. 3.11 b)



Obr. 3.11 c)

Jestliže pracují dva alternátory do jednoho transformátoru, je třeba chránit tento transformátor rozdílovou ochranou v pětibodovém zapojení. Zapojení dalších rozdílových ochran je v souladu s předchozími případy, jak je uvedeno na obr. 3.11. Rozdílová ochrana pracuje velmi rychle - vydává vypínací impuls za 50 ms. U turboalternátoru je třeba ještě vydat povel odbuzovači a rychlouzávěru páry.



Obr. 3.12. Zapojení rozdílových ochran dvojbloku

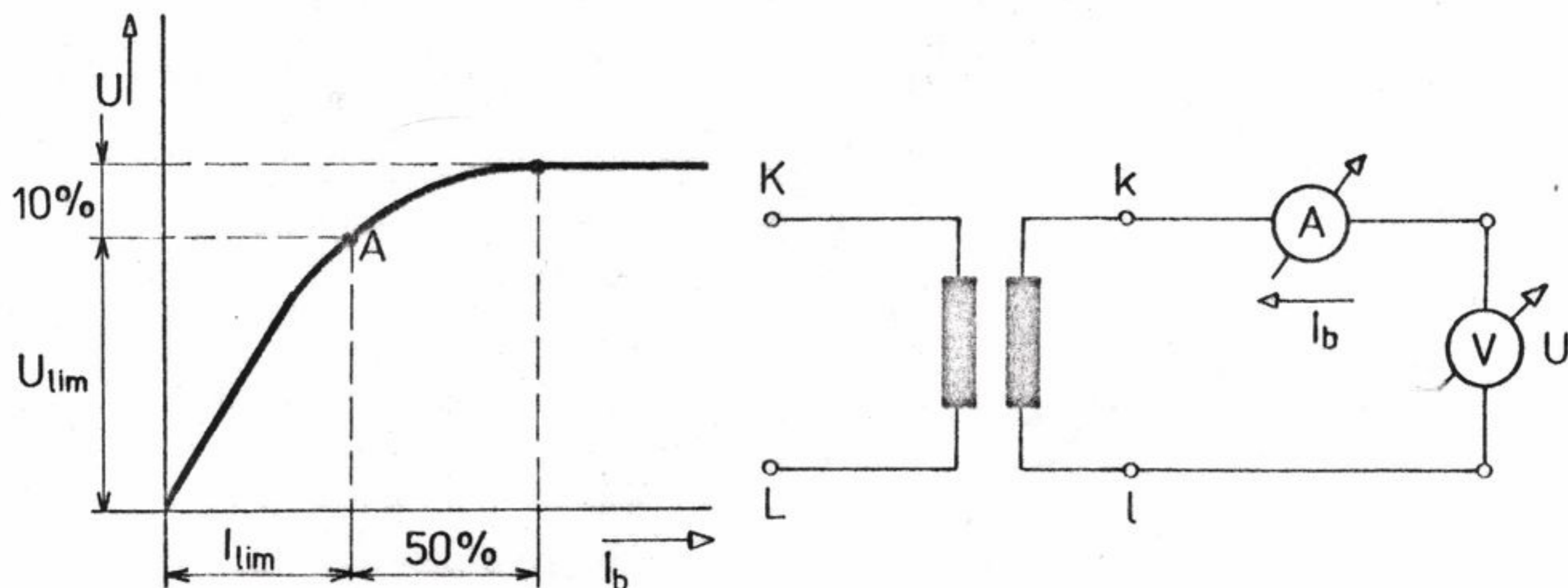
Zajištění podmínek pro správnou funkci rozdílové ochrany

1/ Návrh jisticích transformátorů proudu (JTP) pro rozdílovou ochranu

Pro připojení rozdílové ochrany je třeba volit takové JTP, které se nepřesytí stejnosměrnou složkou zkratového proudu. Tomuto požadavku vyhovují JTP třídy PL, které jsou charakterizovány těmito údaji :

- I_{1n} ... jmenovitý primární proud
- I_{2n} ... jmenovitý sekundární proud
- U_{lim} .. limitní napětí - napětí v ohybu budící charakteristiky
- I_{lim} .. limitní budící proud - proud v ohybu budící charakteristiky
- R_2 ... ohmický odpor sekundárního vinutí JTP při teplotě 75 °C
- Z_p ... závitový převod - vyjádřený poměrem počtu primárních a sekundárních závitů

Budící charakteristika je grafické vyjádření závislosti indukovaného napětí o kmitočtu 50 Hz na budícím proudu. Budící charakteristika a způsob jejího měření je na obr. 3.13.



Obr. 3.13. Budící charakteristika JTP a její měření

Ohyb charakteristiky je určen bodem A, kdy zvýšení napětí o 10% způsobí zvětšení budícího proudu o 50 %.

Požadované limitní napětí se počítá podle vztahu :

$$U_{lim} > 0,7 I_{kS}^{(3)} \frac{X}{R} \sum R_2 \quad [V] \quad (3.1)$$

JTP musí splňovat ještě podmínku :

$$U_{lim} > 2 I_{lim} \cdot \frac{X}{R} \sum R_2 \quad [V] \quad (3.2)$$

kde : (3)
 I_{kS} ... efektivní hodnota souměrného zkratového proudu [A] přepočtená na sekundární stranu JTP. Uvažujeme situaci kdy se v místě zapojení rozdílové ochrany vyvine největší zkratový proud.

$\frac{X}{R}$... poměr reaktance a odporu zkratového obvodu

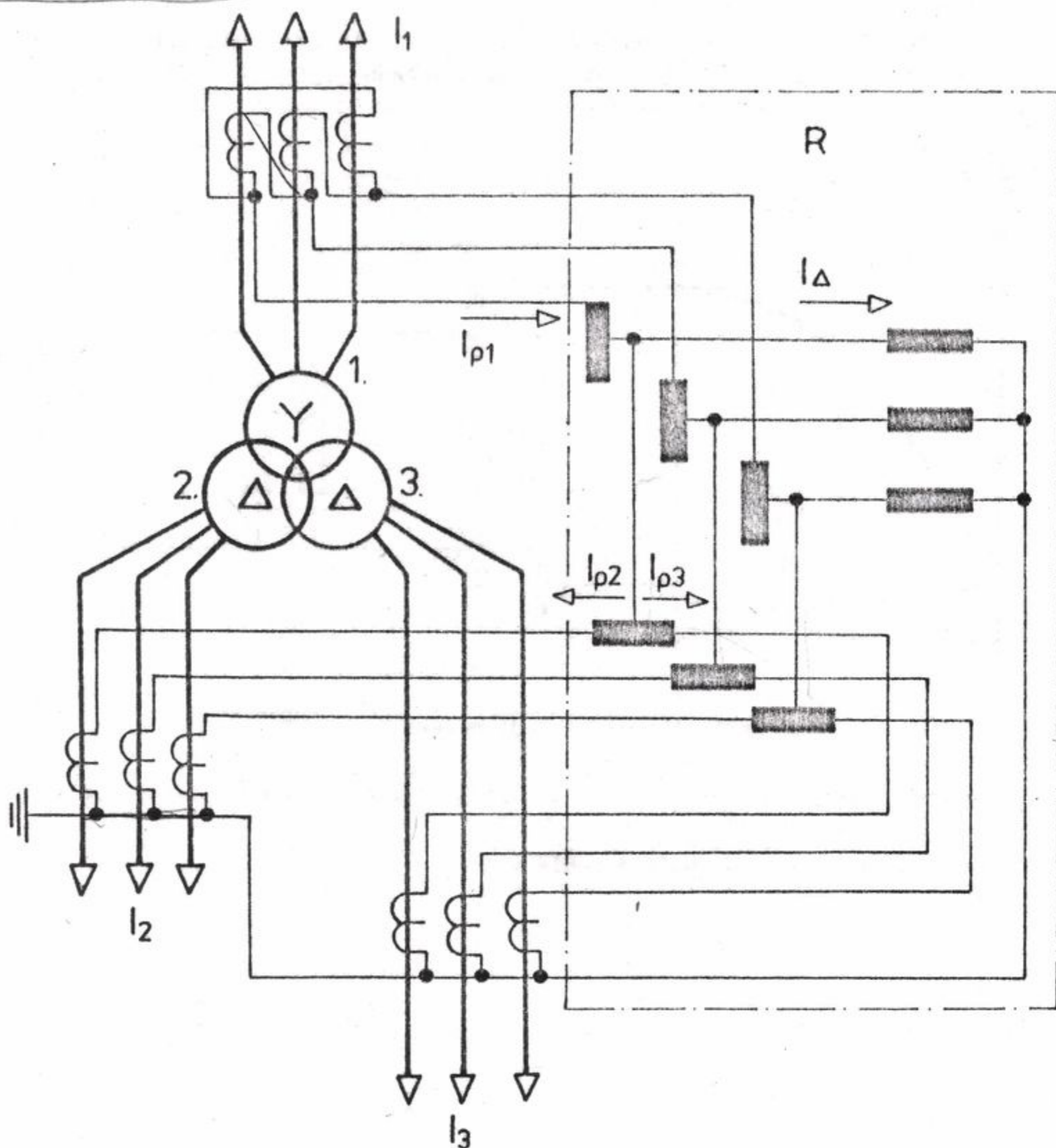
$\sum R_2 = R_2 + R_v$ kde R_v ... odpor přívodů od JTP k rozdílové ochraně [Ω]

Pro JTP se sekundárními vinutími zapojenými do hvězdy je : $\sum R_2 = R_2 + R_v$

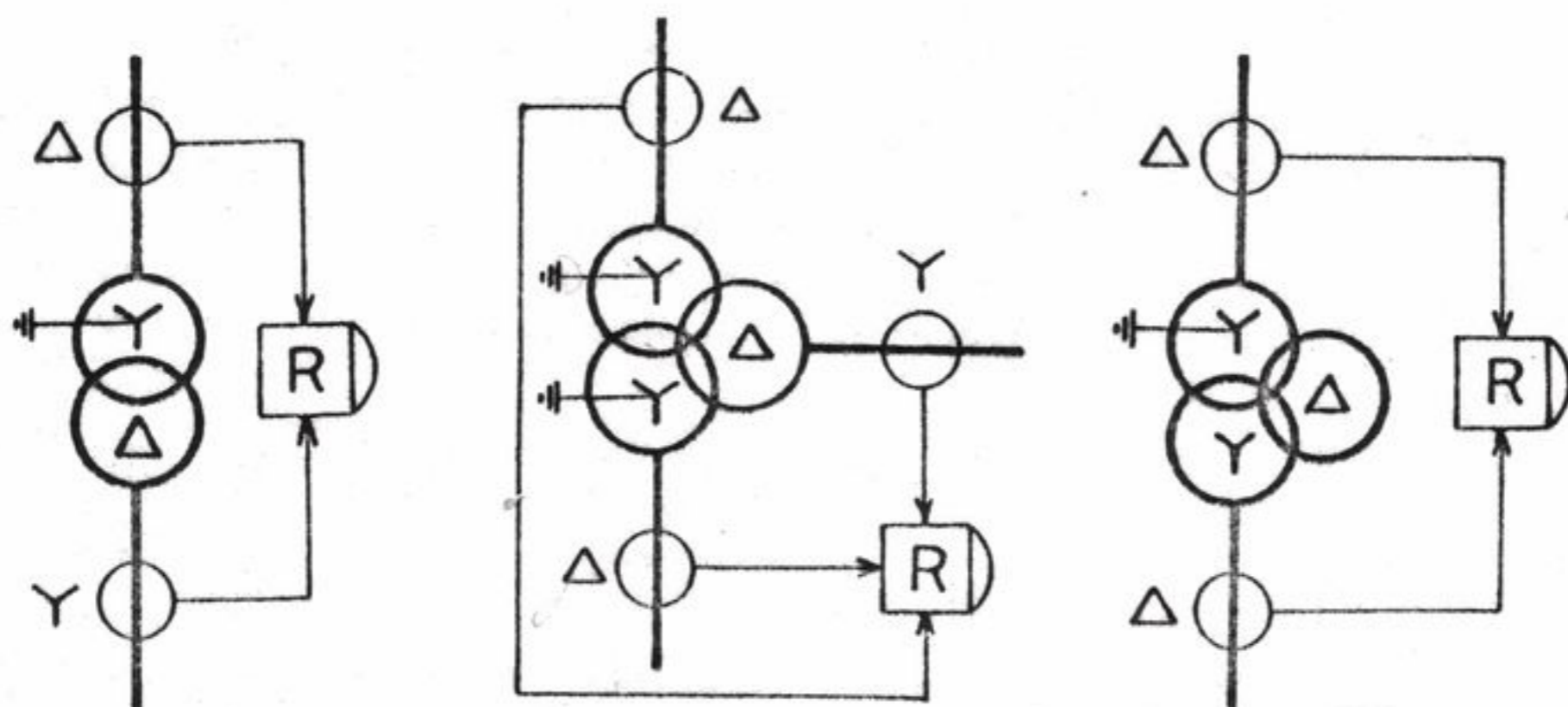
Pro JTP se sekundárními vinutími zapojenými do trojúhelníka je $\sum R_2 = R_2 + 3R_v$

Vnitřní odpor ochrany je tak malý, že jej lze zanedbat.

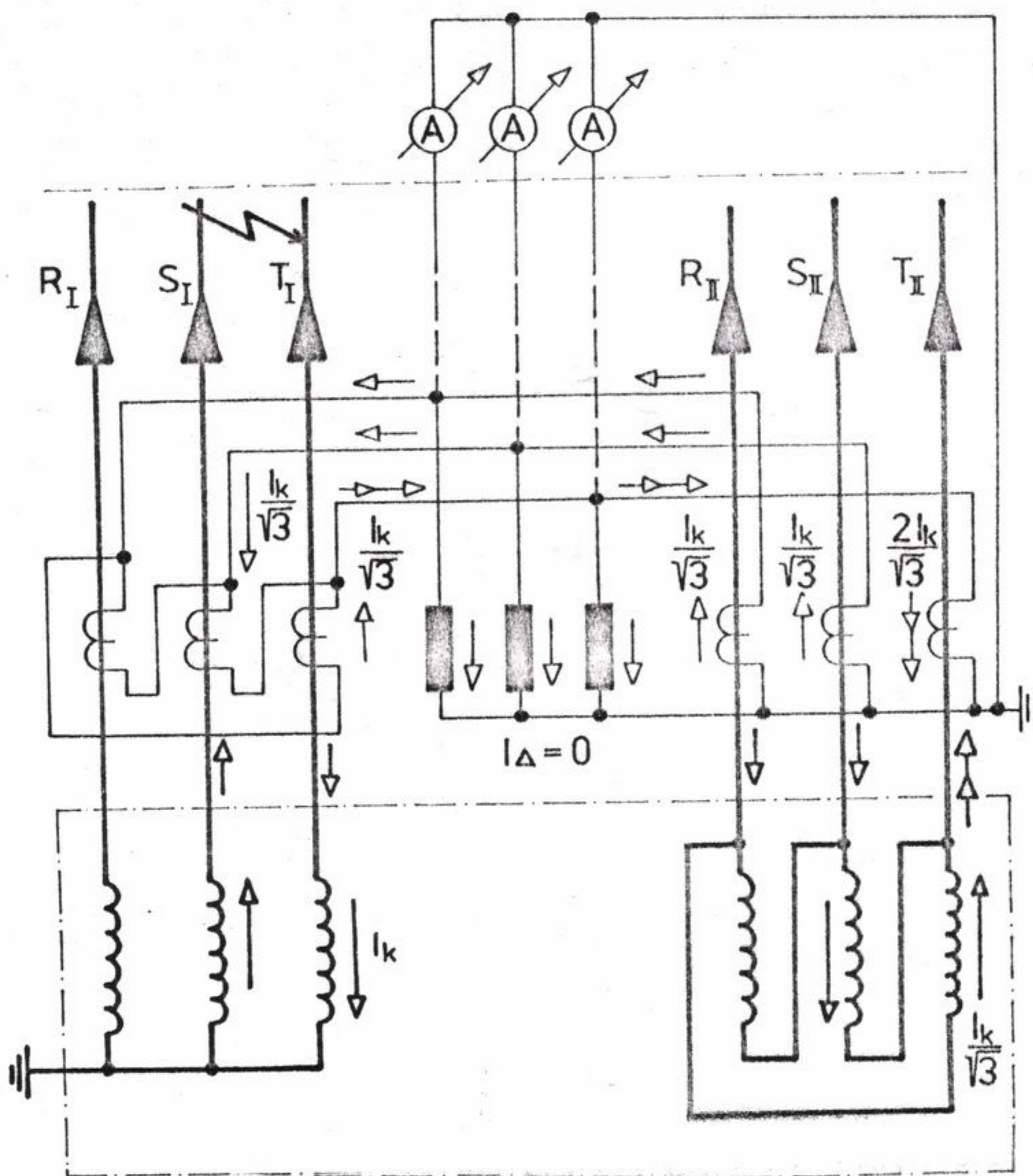
Zemění sekundárního vinutí všech skupin JTP rozdílové ochrany musí být provedeno v jednom společném bodě, aby při přechozích zkratech nedošlo k chybnému působení ochrany vlivem zavlčených proudů. Příklad zapojení JTP pro třífázovou rozdílovou ochranu transformátoru se třemi vinutími je uveden na obr.3.14. Sekundární vinutí zapojená do trojúhelníka jsou uzeměna přes impedanci ochrany.



Obr. 3.14. Třífázová rozdílová ochrana - zapojení JTP



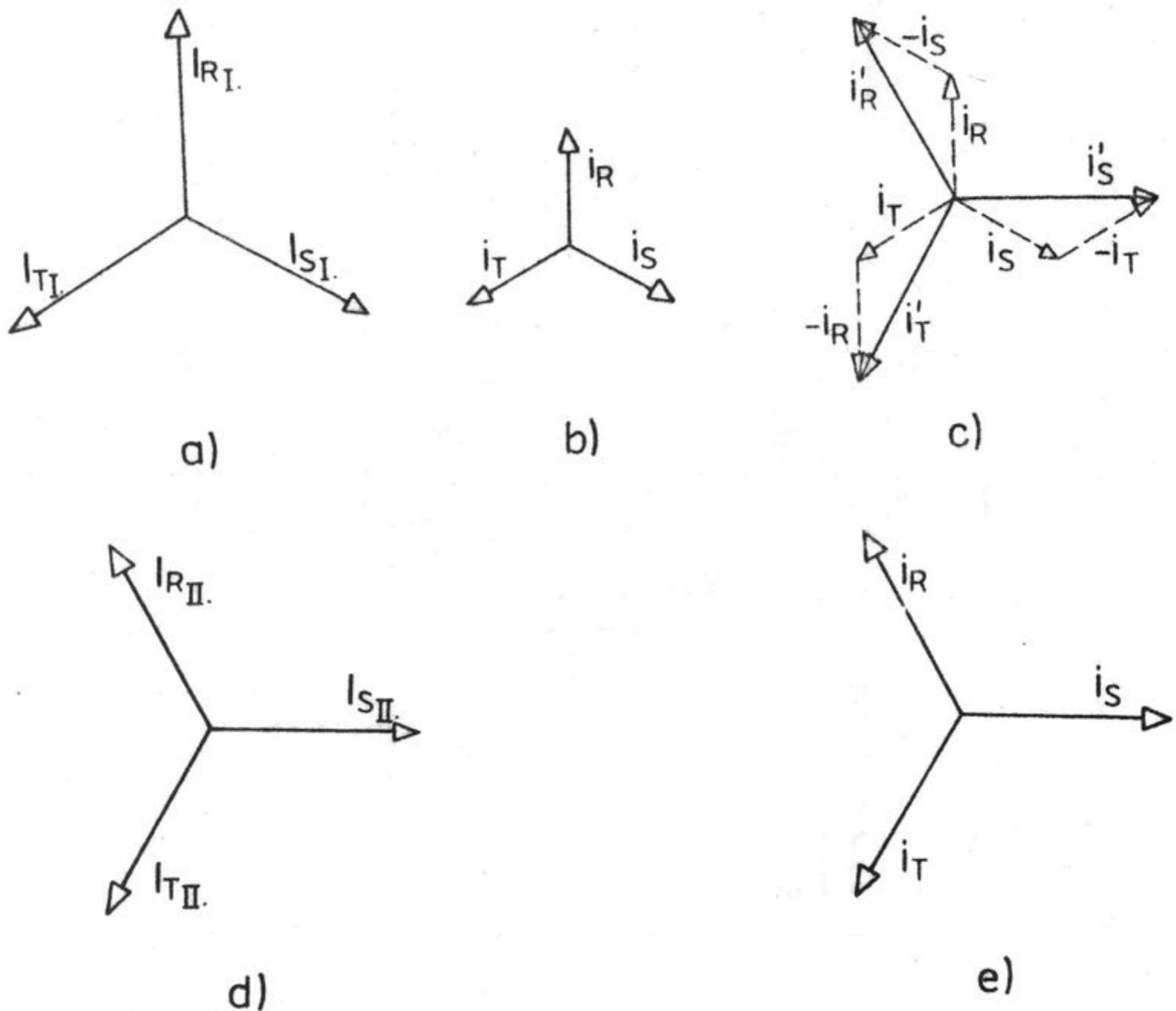
Obr. 3. 15. Zapojení JTP a rozdílových ochran



Obr. 3. 16. Kompenzace rozdílových proudů

U transformátorů připojených na systém vvn s uzeměnou neutrálou musí být takové zapojení JTP a rozdílové ochrany, aby při jednofázovém zkratu v systému se nemohla uzavírat nulová složka proudu rozdílovou ochranou. Zapojení rozdílové ochrany pro různé typy transformátorů je na obr. 3. 15. Zde platí zásada, že JTP ve vývodu primárního vinutí chráněného transformátoru musí mít stejné zapojení jako jeho sekundární vinutí a naopak JTP ve vývodu sekundárního vinutí transformátoru jsou zapojeny jako primární vinutí chráněného transformátoru.

Správné zapojení JTP a rozdílové ochrany si můžeme nejlépe ověřit zakreslením toku proudu na primární a sekundární straně při dvoupólovém zkratu na straně vvn jak je provedeno na obr. 3. 16. Zapojení JTP je provedeno podle shora uvedených zásad tak, aby byly kompenzovány rozdíly proudu na výstupu z JTP dané zapojením chráněného transformátoru. Podle obr. 3. 16. je zřejmé, že při vnějším zkratu, kdy rozdílová ochrana nemá působit, je proud v diferencních větvích roven nule. Na tomto obr. 3. 16. je rovněž naznačen postup při měření nevyrovnaných proudů obou skupin JTP přímou metodou. (Přívody k ampérmetrům kreslené přerušovanou čarou slouží pouze pro měření při uvádění transformátoru do provozu.) Vyrovňovací funkce daná zapojením JTP za normálního provozu je naznačena na obr. 3. 17. pro transformátor zapojení Yd 11.



Obr. 3. 17. Vyrovnaní proudů jisticích transformátorů proudu rozdílové ochrany

Kde značí : a) primární proudy JTP na primární straně chráněného transformátoru
b) proudy v sekundárním vinutí JTP

- c/ proudy na výstupu JTP zapojených do hvězdy (na rozdíl fázových proudů) ,
- d/ primární proudy JTP na sekundární straně (vn) chráněného transformátoru Yd11 (za výstupními svorkami) ,
- e/ sekundární proudy JTP

Z obr. 3.17. je patrné, že sekundární proudy obou skupin JTP na primární a sekundární straně chráněného transformátoru se shodují co do velikosti absolutní hodnoty i co do fázového posunutí : $i'_R = i_R ; i'_S = i_S ; i'_T = i_T$.

Vyrovnění proudů skupin JTP dosažené jejich vhodným zapojením pro rozdílovou ochranu nám dovoluje vypustit instalaci pomocných vyrovnávacích transformátorů proudů v sekundárním obvodu. To je velmi výhodná skutečnost, neboť limitní napětí se zvětšuje s růstem ohmické zátěže v sekundárním obvodu podle vztahu (2.138). S ohledem na vypuštění vyrovnávacích transformátorů proudů je nutné volit JTP s takovými primárními proudy, aby vyrovnávací proud byl co nejmenší. U JTP zapojených do trojúhelníka volíme převod $\frac{I_1 \cdot \sqrt{3}}{5}$ nebo $\frac{I_1 \cdot \sqrt{3}}{1}$ neboť nejsou normalizovány jiné sekundární proudy než 1A a 5A.

I_1 značí hodnotu primárního proudu JTP. Pro proudy $I_1 \sqrt{3}$ bereme nejbližší hodnotu z řady normalizovaných jmenovitých primárních proudů.

Nastavení rozdílové ochrany

Procentní stabilizovaná rozdílová proudová ochrana s blokováním druhou harmonickou při zápnacím magnetizačním proudu transformátoru se nastizuje podle těchto pravidel :

Rozběhový proud ochrany :

$$i_r = \frac{3}{2} \Delta i_n + 0,2 \quad (3.3)$$

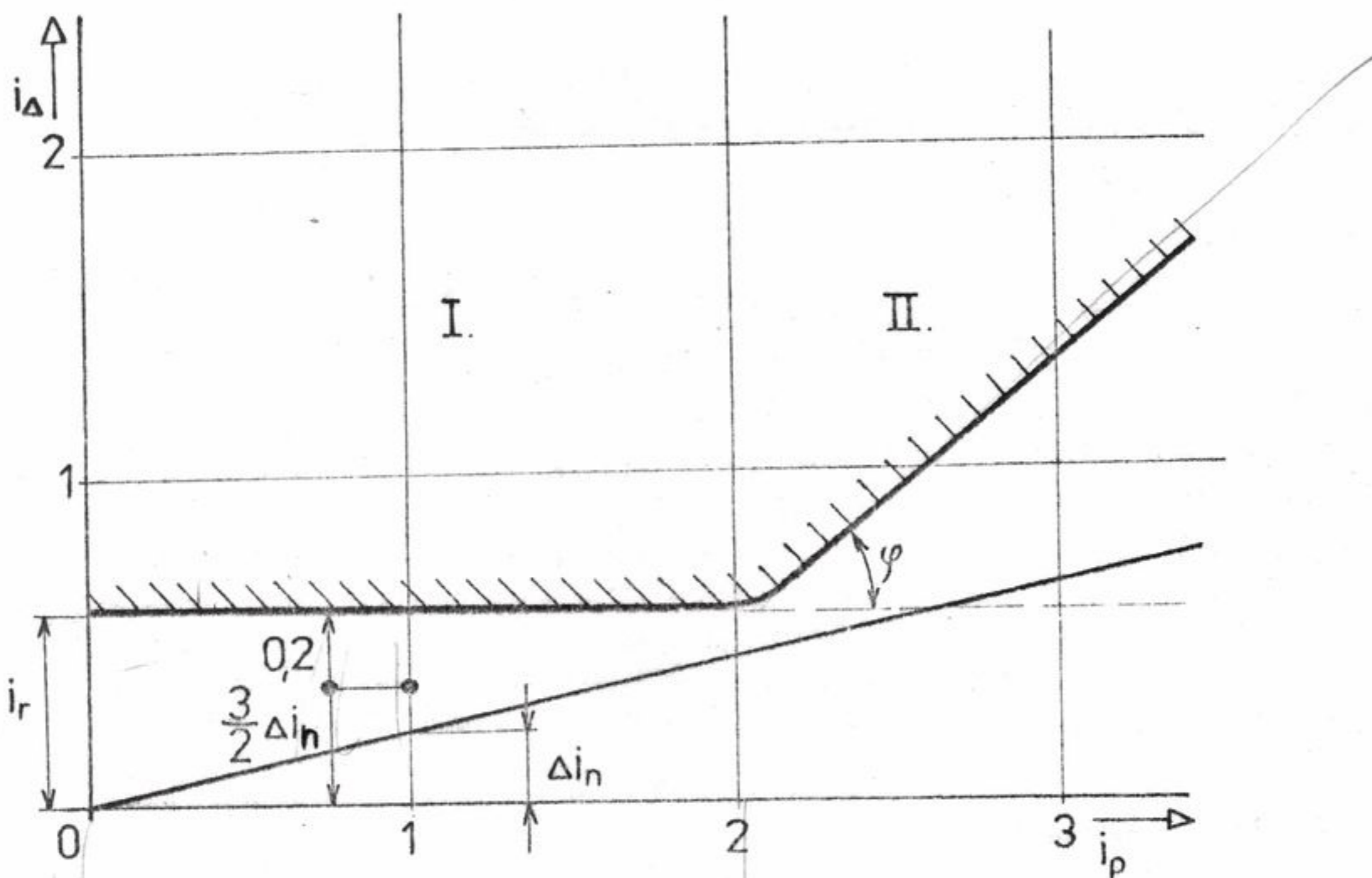
kde :

$\Delta i_n = \frac{\Delta I_n}{I_n}$... poměrná hodnota rozdílového proudu tekoucího ochranou při jmenovitém proudu v chráněném objektu.

$\frac{3}{2}$... koeficient zvýšené citlivosti při třífázovém symetrickém zkratu oproti jednofázovým nebo dvoufázovým zkratům, kdy je různá citlivost ochrany. Důvodem je zapojení usměrňovacího obvodu pro měřící rozdílový členek.

0,2 ... bezpečnostní odstup charakteristiky rozdílové ochrany od přímky vyrovnávacích rozdílových proudů.

Charakteristika rozdílové ochrany s lomeným průběhem je na obr. 3.18, kde na vodorovnou osu vynéšíme hodnoty průchozích proudů i_p , na svislou osu rozdílové proudy i_Δ .



Obr. 3.18. Charakteristika rozdílové ochrany

Pro průchozí proud platí vztah :

$$i_p = \sum_{j=1}^n |i_j| \sqrt{2} \quad (3.4.)$$

kde :

$$i_p = \frac{I_p}{I_n}$$

I_p ... proud procházející chráněným objektem

I_n ... jmenovitý proud chráněného objektu

i_j ... proudy v jednotlivých větvích chráněného objektu

Pro rozdílový proud platí :

$$i_{\Delta} = \left| \sum_{j=1}^n i_j \right| \quad (3.5.)$$

Charakteristika rozdílové ochrany je definována ve dvou oblastech :

I. $i_p \leq 2$

Rozběh rozdílové ochrany nastane při splnění podmínky :

$$i_{\Delta} \geq i_r \quad (3.6.)$$

II. $i_p > 2$

Rozběh rozdílové ochrany nastane při splnění podmínky :

$$i_{\Delta} \geq i_r + (i_p - 2) \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (3.7.)$$

Rozdílová ochrana přípojnic - R 23

Při zkratu na přípojnicích může dojít k výpadku velkých energetických celků, narušení stability systému a není-li zkrat vypnut v krátkém čase, tak i ke značnému poškození zařízení.

Dosud jsou přípojnice chráněny distančními ochranami vedení a to záložním stupněm. Zkraty na přípojnicích jsou pak vypnuty v čase až 0,6 s, což je nevyhovující. Při chránění přípojnic distančními ochranami se obtížně dosahuje selektivního působení. Proto se dnes někdy uplatňuje použití rychlých a selektivních diferenciálních ochran přípojnic.

Rozdílová ochrana přípojnic R 23 je proudová stabilizovaná ochrana, která pracuje na obdobném principu jako rozdílové ochrany transformátorů a alternátorů. Principiální schéma je uvedeno na obr. 3.19.

Ochrana porovnává neustále součet proudů vstupujících do přípojnic a součet proudů z přípojnic vystupujících. Tyto hodnoty se porovnávají pomocí můstkového zapojení ochrany a po usměrnění jsou přivedeny do vlastního měřicího můstku, jehož druhou polovinu tvoří kompenzační větev. Stupeň kompenzace, lineárně rostoucí s průchozím proudem, lze předem pevně nastavit. Diference proudu I_{Δ} je získána v diagonále - transformátor T_1 . Průchozí proud je přiváděn z transformátorů T_3 a T_2 do kompenzační větve a stupeň kompenzace nastaven na odporu R . Rovnováhu měřicího můstku lze vyjádřit vztahem :

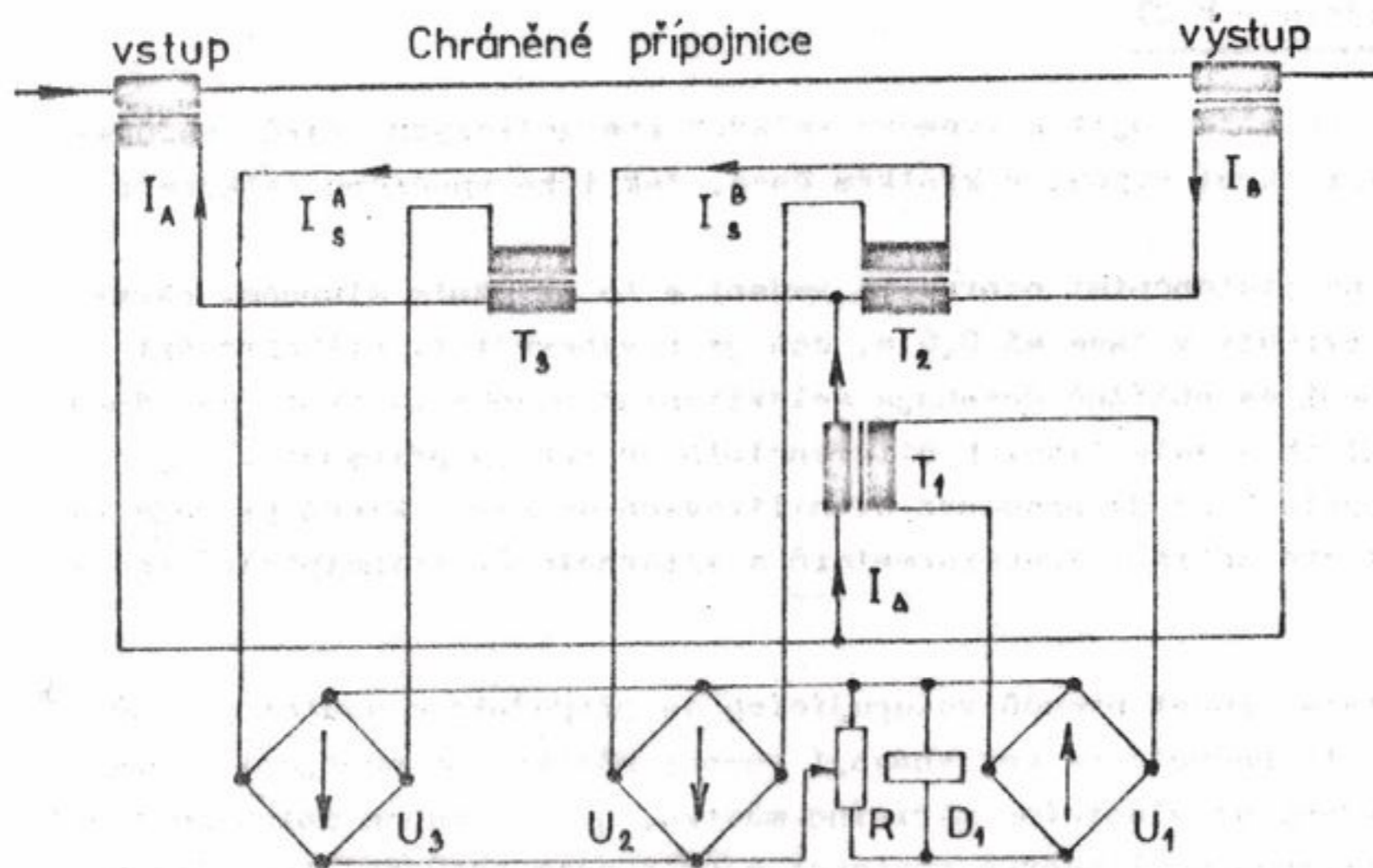
$$I_{\Delta} = K (|I_A| + |I_B|) + |I_0| \quad (3.8.) \text{ kde značí :}$$

- K ... faktor stabilizace
- I_A .. součet proudů vstupních
- I_B .. součet proudů výstupních
- I_0 .. rozběhová hodnota proudu relé D

Má-li být ochrana R 23 provozně využita, je nutné rozdělit provoz rovnoměrně na obě přípojnice a to tak, aby každá přípojnice byla pokud možno energeticky vyrovnaná, t.j. aby přívod elektrické energie se rovnal odběru a přes zapnutý příčný spínač přípojnic tekla minimální proud. Potom při zkratu na jedné přípojnici je postižená přípojnice odpojena všemi vypínači na ni připojenými a na druhé přípojnici zůstane zachován normální provoz.

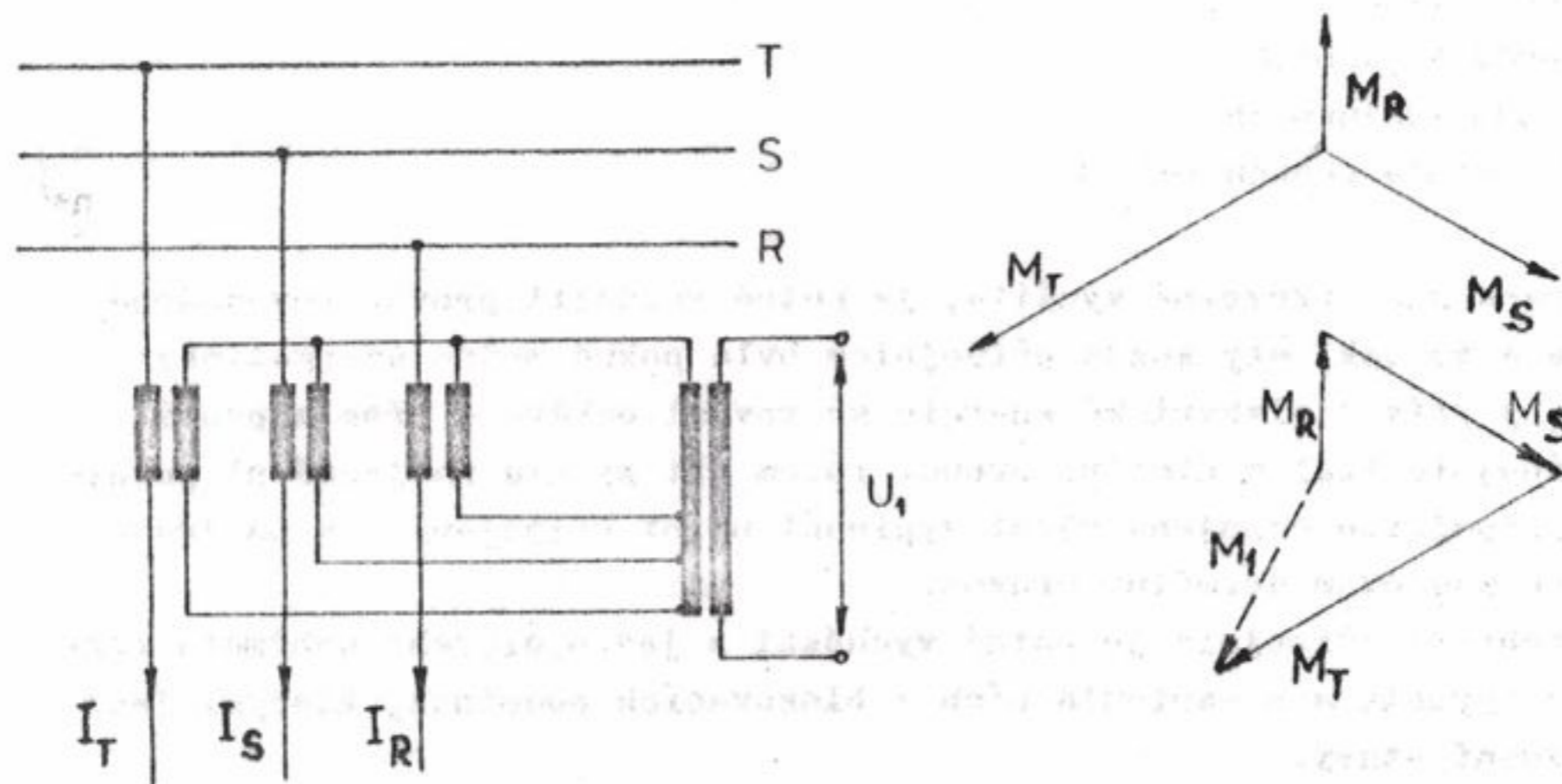
Při projektu ochrany přípojnic je nutné vycházet z jednopólového schématu rozvodny, zkratového výpočtu a z manipulačních a blokovacích podmínek, kterými jsou dány všechny provozní stavy.

Každá změna v silnoproudé konfiguraci rozvodny se musí též promítnout do zapojení ochrany přípojnic R 23. Projekt této ochrany je třeba provést s ohledem na budoucí výstavbu rozvodny a způsob provozu.



Obr. 3.19. Rozdílová ochrana přípojnic

přepínání. Proto je použito sčítacího transformátoru fázových proudů, který umožňuje přenos součtu tří fázových proudů. Schema příslušného uspořádání je na obr. 3.20.



Obr. 3.20. Zapojení sčítacího transformátoru

Magnetizační ampérvévity v jednotlivých fázích :

$$R : \dots M_R = n \cdot I_R$$

$$S : \dots M_S = 2n I_S$$

$$T : \dots M_T = 3n I_T$$

(3.9)

Výsledná magnetomotorická síla je pak :

$$M_1 = M_R + M_S + M_T = n (I_R + 2I_S + 3I_T)$$

(3.10)

Vlivem nestejného převodu transformátorů proudů teče při vnějším průchodním zkratu vyrovnávací proud v diferenciální větvi, který by mohl způsobit chybné působení ochrany. Proto roste lineárně s průchodním proudem proud kompenzační, který rozdílovou ochranu stabilizuje. V třífázovém systému je nutno chránit všechny tři fáze samostatně, to znamená, že rozdílová ochrana by měla tři systémy měření. Toto uspořádání je nevhodné jak pro svou složitost v zapojení, tak i pro nemožnost jednoduchého

Citlivost ochrany je pak ale pro různé druhy zkratů různá :

| Zkrat : | Citlivost : |
|-------------------------|--------------------|
| Mezi fází T a nulou ... | 1,4 I _n |
| Mezi fází S a nulou ... | 0,9 I _n |
| Mezi fází R a nulou ... | 0,5 I _n |
| Trojfázový zemní ... | 0,8 I _n |

Protože se mění konfigurace spojení vývodů na přípojnicích, je nutno stejně měnit i způsob zapojení rozdílové ochrany. To se děje za součinnosti pomocných kopírovacích relé, které vytváří na měřicí straně stejný obraz přípojnic, jaký je na straně silnoproudé. Náběh diferenciálního článku se stabilizuje podle vztahu :

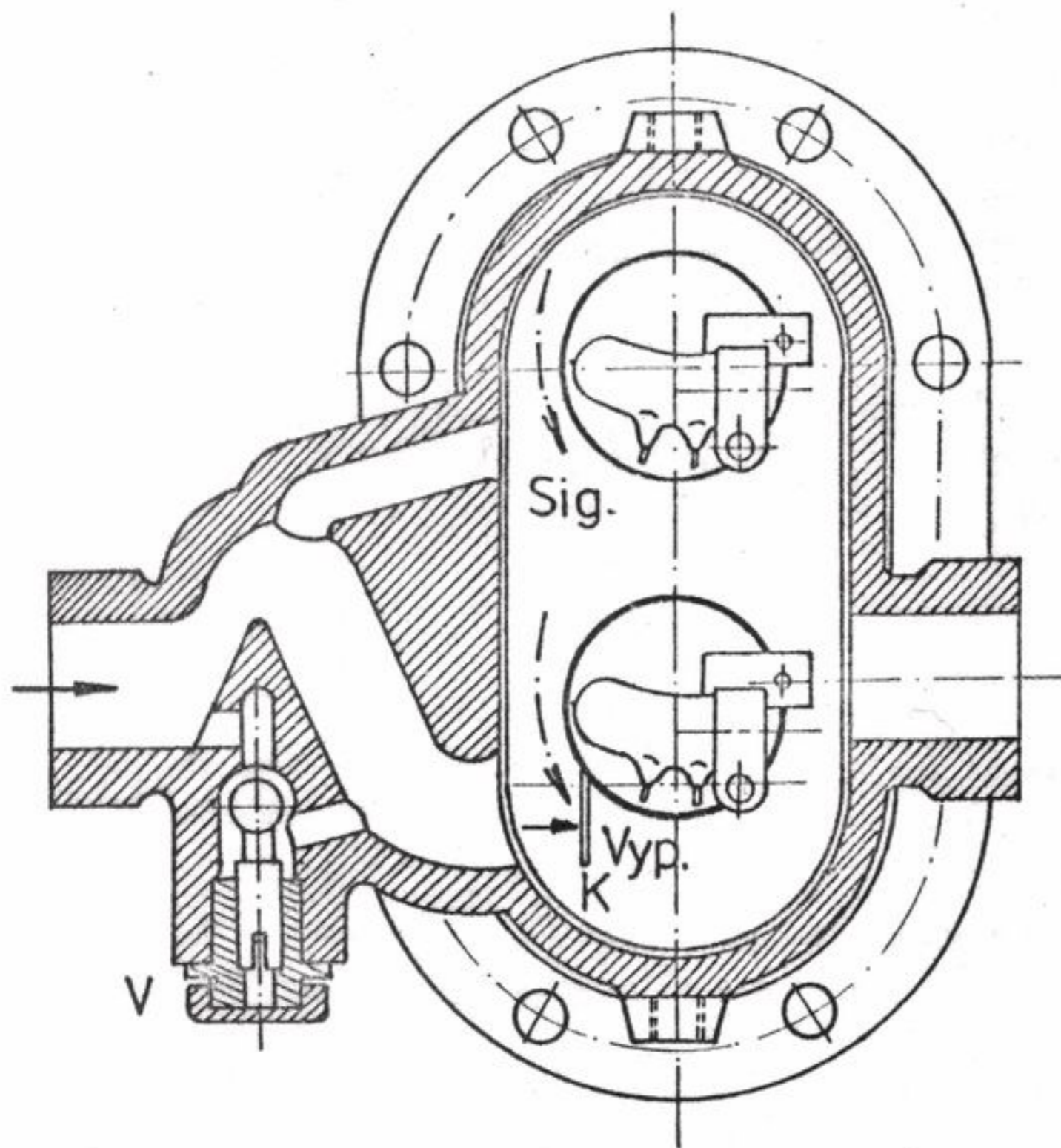
$$I_{\Delta}^{(1)} = \frac{I_0}{1 - K} \quad \dots \text{ při vnitřním zkratu} \quad (3.11)$$

$$I_{\Delta}^{(2)} = \frac{|I_0| + 2K|I_A|}{1 + K} \quad \dots \text{ při vnějších zkratech} \quad (3.12)$$

Rozdílová ochrana přípojnic působí v čase asi 40 ms. Vypínací impuls je veden přes popudový článek příslušného vývodu na výkonový vypínač, aby nedošlo k vyslání vypínacího impulsu na jiný vývod.

3.1.1. Ochrany transformátorů

Plynové - Buchholzovo relé



Plynové relé se používají pro ochranu transformátorů s olejovým chlazením. Umísťují se ve spojovacím potrubí mezi víkem nádoby transformátoru a mezi konservátorem. Plynové relé reagují na vývoj plynů způsobený poruchou či zvýšenou teplotou vinutí nebo na přítomnost vzduchu v nádobě transformátoru, která může být způsobena unikáním oleje z nádoby. Na nadměrně rychlé proudění oleje z nádoby transformátoru do konservátoru reaguje toto relé rovněž jako na poruchový stav. Plynové relé vysílá buď signalizační (poruchový) impuls, nebo impuls vypínací.

Vlastní plynové relé sestává z nádoby, ve které jsou umístěny dva plováky se rtuťovými položovými kontakty. Spodní plovák má navíc křídélko K, které

Obr. 3.21. Plynové-Buchholzovo relé

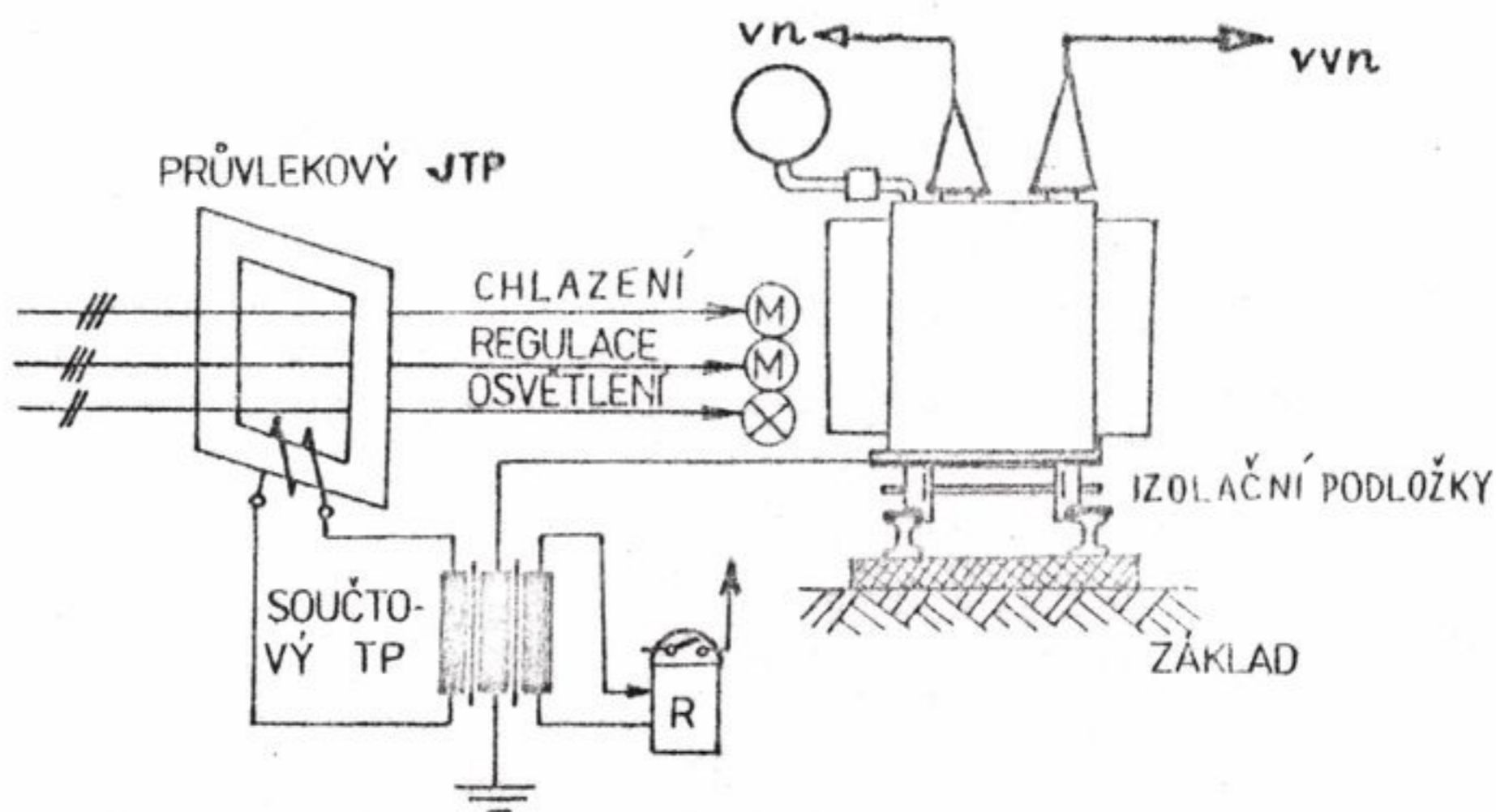
způsobí překlopení plováku při zvýšeném proudění oleje. Horní plovák slouží obvykle k signalizaci při hromadění plynu v oleji, dolní plovák působí při ztrátě oleje, nebo při zvýšeném proudění oleje. Principiální schéma Buchholzova relé je nakresleno na obr. 3.21.

Zemní ochrana transformátorů

V některých případech se používá pro ochranu transformátorů jednoduché zemní ochrany (někdy také název - kostrová, Chevalierova).

Transformátor, který chráníme, musí být odizolován od základu a uzemnění jeho kostry se vede přes proudový měřicí transformátor, na který je připojeno proudové relé. Impuls relé je přiveden na vypínač, který odpojí chráněný transformátor bez časového zpoždění.

Protože výstroj a příslušenství transformátoru je napájeno střídavým proudem nn, pak jednopólový zkrat v těchto obvodech by měl za následek chybné zapůsobení zemní ochrany. Tomu lze zabránit tak, že napájíme příslušenství hlavního transformátoru přes izolační transformátor, jehož nula není uzemněna. Výhodnější je však použití průvlekového měřicího transformátoru, jehož jádrem prochází vodiče pro napájení pomocných zařízení. Potom při jednofázovém nebo vícefázovém zkratu na střídavých obvodech pomocných zařízení transformátoru vznikne následkem nesymetrie proudů proud ve vinutí průvlekového JTP, který se vede do součtového transformátoru proudu TP, kde kompenzuje zkratový proud. To znamená, že účinky obou proudů se vzájemně ruší a přes proudové relé neprotéká žádný proud. Situace je znázorněna na obr. 3.22.



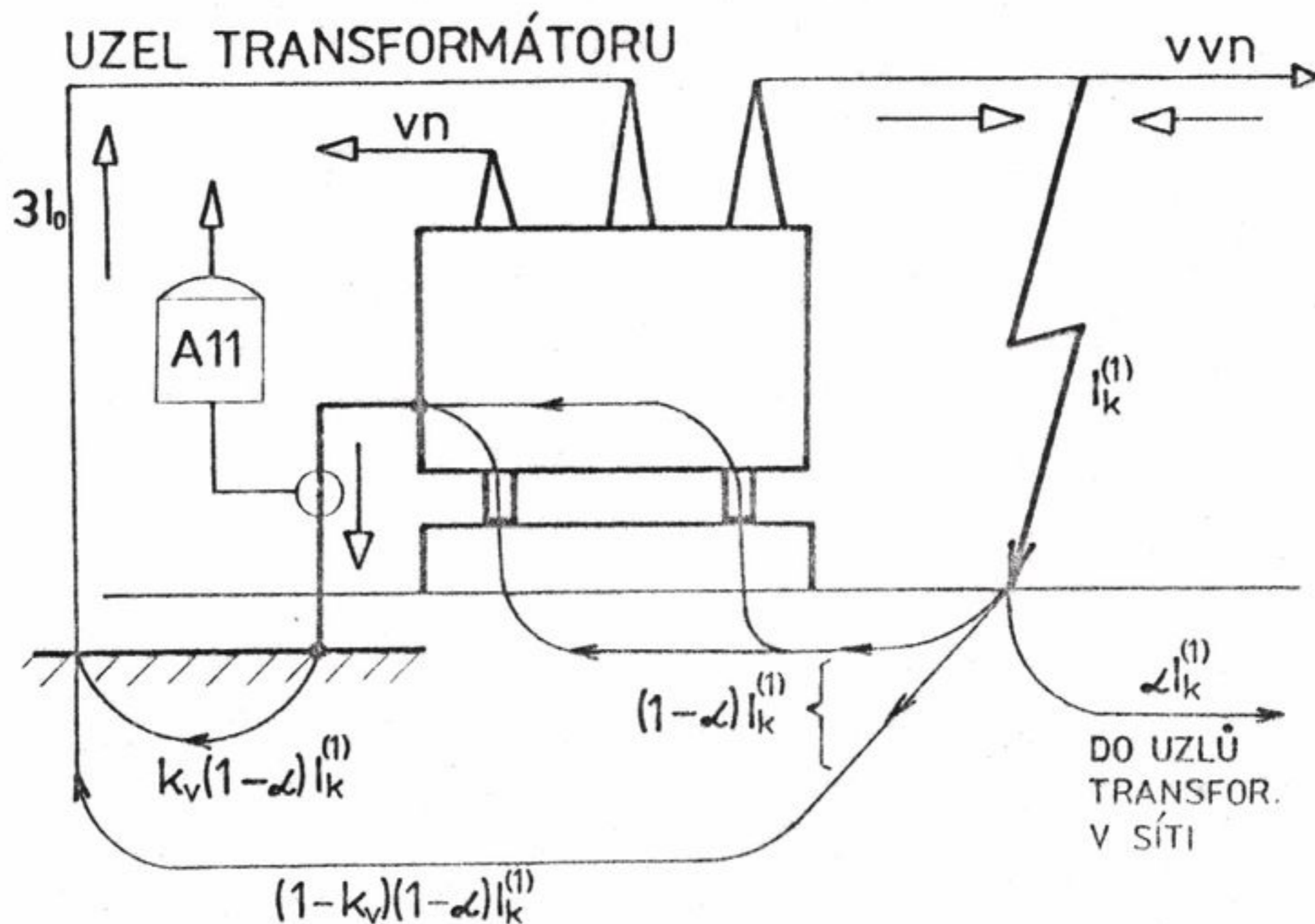
Obr. 3.22. Zemní ochrana nádoby transformátoru

Nastane-li v transformátoru zkrat nebo zemní spojení na kostru ze strany vvn, nebo vn, potom uzemněním přes měřicí transformátor protéká zkratový, nebo svodový proud. Dosáhne-li nařízené hodnoty proudového relé, uvede tento proud relé v činnost.

Zemní ochranu transformátoru musí však doplňovat ještě relé plynové a nadproudé. Někdy lze jedno vinutí blokového transformátoru ze strany alternátoru chránit zemní ochranou alternátoru.

Nastavení zemní ochrany nádoby blokového transformátoru

Působení zemní ochrany nádoby transformátoru nesmí nastat v případě, kdy dojde na vedení vvn k jedнопólovému (zemnímu) zkratu. Část zkratového proudu teče do uzlů transformátorů v síti, zbývající část do uvažovaného blokového transformátoru. Poměry při zkratu jsou na obr. 3.23. Relé A11 představuje zemní ochranu nádoby.



Obr. 3.23. Poměry při zkratu na vedení vvn

Rozdělení proudu při zkratu na vedení vvn budeme respektovat koeficientem α :

$$I_k^{(1)} = \alpha I_k^{(1)} + (1 - \alpha) I_k^{(1)} \quad (3.13)$$

kde :

$I_k^{(1)}$... je celkový jedнопólový proud zkratový

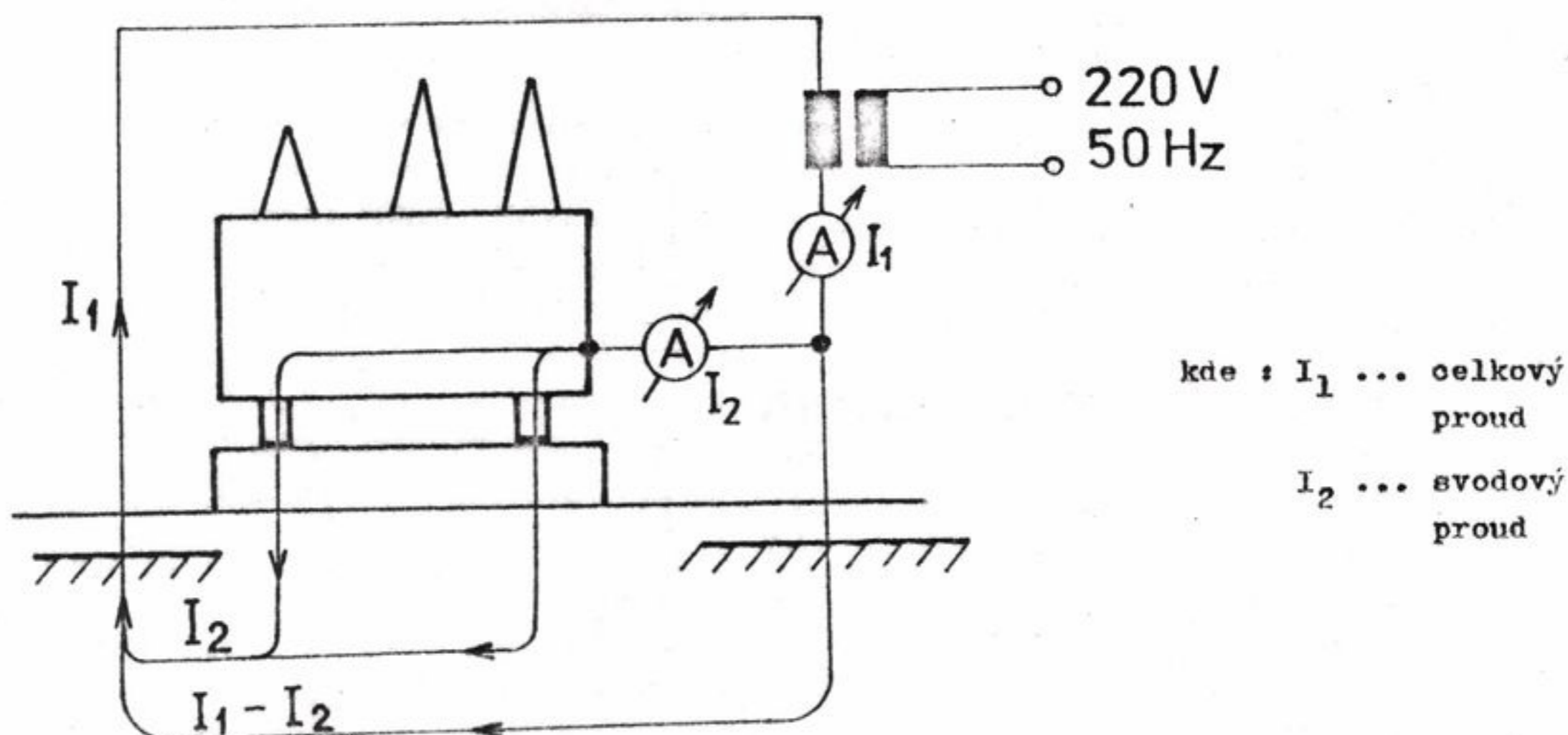
$\alpha I_k^{(1)}$... je část ztrát proudu tekoucího do uzlů transformátorů v síti

$(1 - \alpha) I_k^{(1)}$... je část zkrat. proudu tekoucího do uzlu blokového transformátoru

Zemní cesta proudu do uzlu blokového transformátoru se rozdělí podle velikosti zemního odporu uzemnění uzlu transformátoru a podle velikosti přechodového odporu mezi nádobou transformátoru a jeho základy. Tento poměr respektujeme konstantou k_v :

$$k_v = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.14)$$

kde proudy I_1 a I_2 respektují poměry podle obr. 3.24 na kterém je znázorněno přímé určení koeficientu k_v .



Obr. 3. 24. Měření koeficientu k_v transformátoru

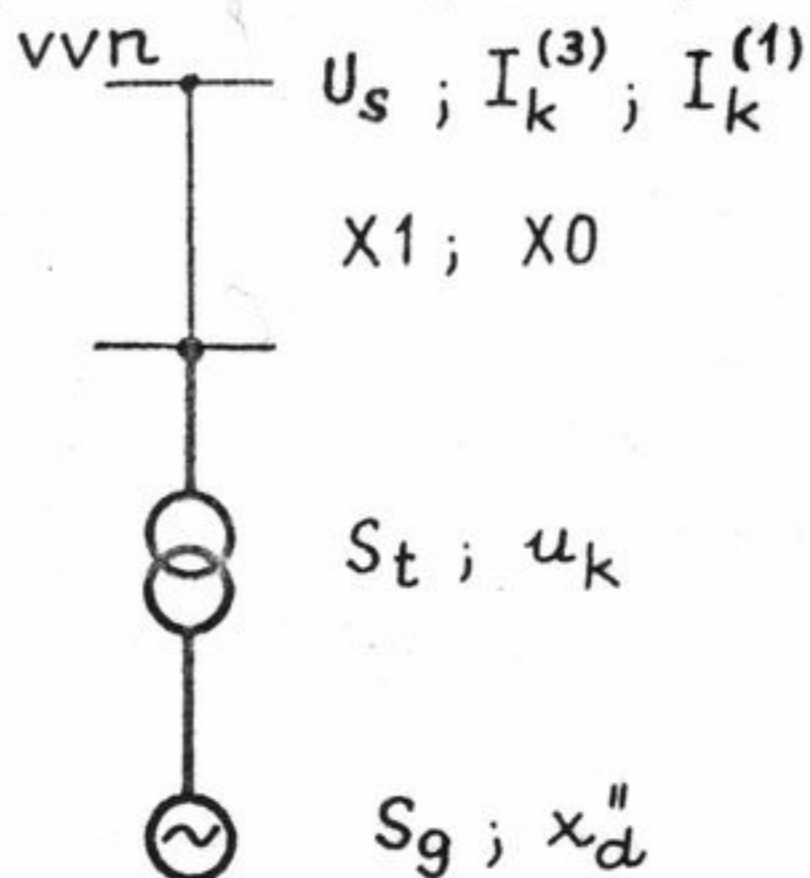
Do uzlu blokového transformátoru teče proud :

$$I_{kA}^{(1)} = (1 - k_v) \cdot (1 - \alpha) \cdot I_k^{(1)} \quad (3.15)$$

Přes základ blokového transformátoru teče proud :

$$I_{kB}^{(1)} = k_v \cdot (1 - \alpha) \cdot I_k^{(1)} \quad (3.16)$$

Tato hodnota proudu je rozhodující pro dolní hranici nastavení zemní ochrany nádoby. Výpočet zkratového proudu a jeho rozdělení provedeme podle situace na obr. 3.25.



kde značí :

- U_s ... napětí sítě [kV]
- $I_k^{(3)}$... třípólový zkratový proud [kA]
- $I_k^{(1)}$... jednopólový zkratový proud [kA]
- X_1 ... sousledná reaktance vedení [Ω]
- X_0 ... nulová reaktance vedení [Ω]
- S_t ... zdánlivý výkon transformátoru [MVA]
- u_k ... napětí nakrátko transformátoru [%]
- S_g ... zdánlivý výkon alternátoru [MVA]
- x_d'' ... rázová reaktance alternátoru [%]

Obr. 3.25. Schema pro výpočet zkratových poměrů

Při výpočtu volíme vztažný výkon rovný výkonu transformátoru :

$$S_v = S_t$$

$$\text{Vztažný proud } I_v = \frac{S_t}{\sqrt{3} U_s} \quad (3.17)$$

Náhradní reaktance sítě :

$$\text{- sousledná : } X_{1S} = \frac{k \cdot I_v}{I_k^{(3)}} \quad \text{kde } k = 1,1 \quad (3.18)$$

$$\text{- zpětná : } X_{2S} = X_{1S} \quad [\text{p.j.}]$$

$$\text{- nulová : } X_{0S} = \frac{k \cdot 3I_v}{I_k^{(1)}} - X_{1S} - X_{2S} \quad [\text{p.j.}] \quad (3.19)$$

Náhradní reaktance vedení vvn :

$$\text{- Jmenovitá impedance : } Z_n = \frac{U_s}{\sqrt{3} I_v} \quad [\Omega] \quad (3.20)$$

$$\text{- sousledná reaktance : } X_{1v} = \frac{X_1}{Z_n} \quad [\text{p.j.}]$$

$$\text{- zpětná reaktance : } X_{2v} = X_{1v}$$

$$\text{- nulová reaktance : } X_{0v} = \frac{X_0}{Z_n} \quad [\text{p.j.}]$$

(3.21)

Náhradní reaktanci transformátoru :

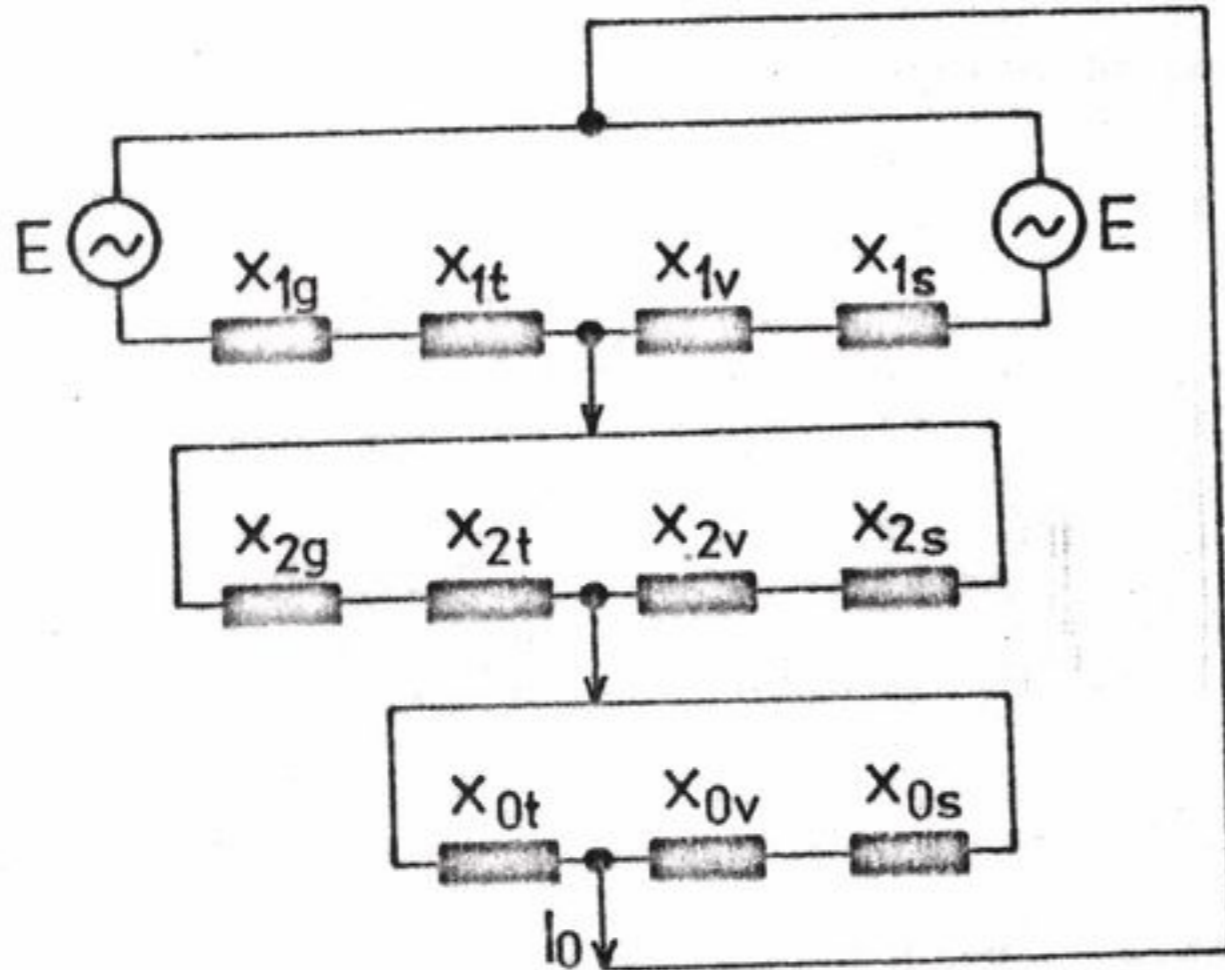
$$X_{1t} = X_{2t} = X_{0t} = X_t = \frac{u_k [\%]}{100} \quad [\text{p.j.}] \quad (3.22)$$

Sousledná složka reaktance transformátoru se ve zvoleném případě rovná zpětné i nulové složce.

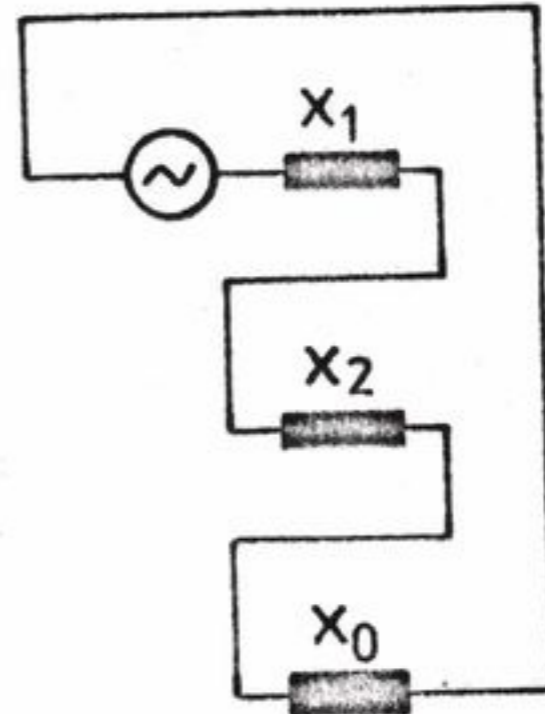
Náhradní reaktance alternátoru

$$X_{1g} = X_{2g} = X_g = \frac{X_d'' [\%]}{100} \cdot \frac{S_v}{S_g} \quad [\text{p.j.}] \quad (3.23)$$

Pro uvedenou situaci si nakreslíme náhradní schéma obr. 3.26 pro případ jednopólového zkratu na vedení vvn a zjednodušené schéma obr. 3.27



Obr. 3.26. Náhradní schema



Obr. 3.27. Zjednodušené schema

Podle náhradního schema je celková sousledná a zpětná reaktance :

$$X_1 = X_2 = \frac{(X_{1g} + X_{1t}) \cdot (X_{1v} + X_{1s})}{X_{1g} + X_{1t} + X_{1v} + X_{1s}} \quad (3.24)$$

Celková nulová reaktance :

$$X_0 = \frac{X_{0t} (X_{0v} + X_{0s})}{X_{0t} + X_{0v} + X_{0s}} \quad (3.25)$$

Jednopolový zkratový proud na začátku vedení vvn :

$$I_k^{(1)} = \frac{k \cdot 3 I_v}{X_1 + X_2 + X_0} \quad [\text{kA}] \quad (3.26)$$

Koeficient rozdělení zkratového proudu :

$$\alpha = \frac{2 X_g + 3 X_t}{2 X_g + 3 X_t + 2 X_s + X_{os} + X_{1v} + X_{2v} + X_{ov}} \quad (3.27)$$

Koeficient k_v bývá pro suchý základ $k_v = 0,003$

Nastavení ochrany

Rozběhový proud ochrany I_R musí být větší než svodový proud :

$$I_R > \frac{k_b \cdot k_v (1 - \alpha) I_k^{(1)}}{P_p} \cdot 10^3 \quad (3.28)$$

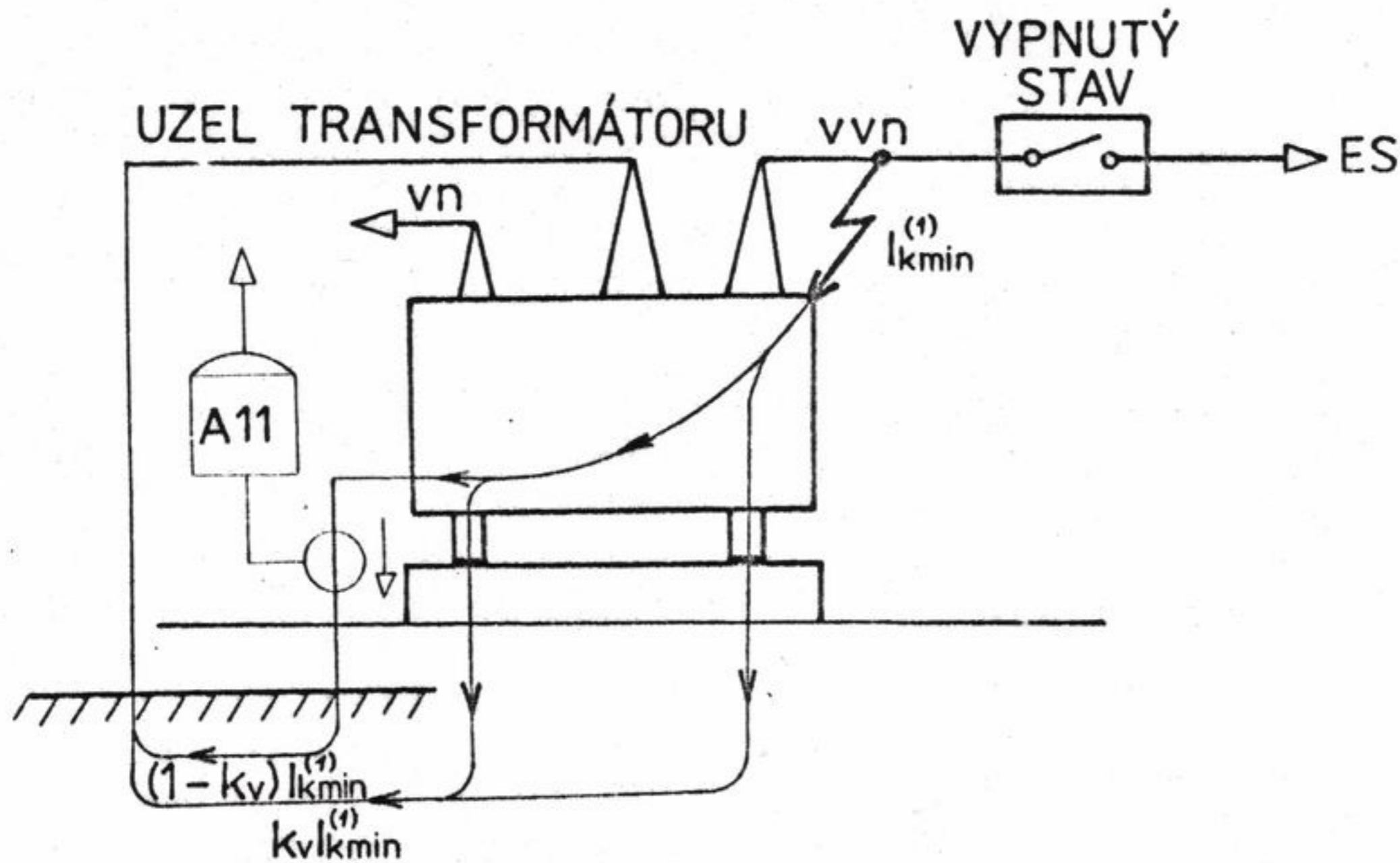
kde :

k_b ... koeficient bezpečnosti

k_b se volí 3 až 4

P_p ... převod JTP (jistícího transformátoru proudu)
(obvykle bývá 200/5A)

Zemní ochrana nádoby blokového transformátoru však musí bezpečně působit i v případě, kdy blokový transformátor není spojen s elektrizační soustavou a do místa zkratu přispívá pouze alternátor podle obr. 3.28



Obr. 3.28. Poměry při jednopólovém zkratu na transformátoru

Jednopólový zkratový proud, uzavírající se přes nádobu blokového transformátoru:

$$I_{k \min}^{(1)} = \frac{k \cdot 3I_v}{2X_g + 3X_t} \quad [\text{kA}] \quad (3.29)$$

Koeficient citlivosti :

$$k_c = \frac{(1 - k_v) I_{k \min}^{(1)}}{I_r \cdot P_p} \cdot 10^3 \quad (3.30)$$

Pro spolehlivé působení ochrany musí být splněna podmínka :

$$k_c \geq 2 \quad (3.31)$$

3. 1. 2. Ochrany alternátoru

Návrh ochrany pro alternátory je řešen podle následujících hledisek :

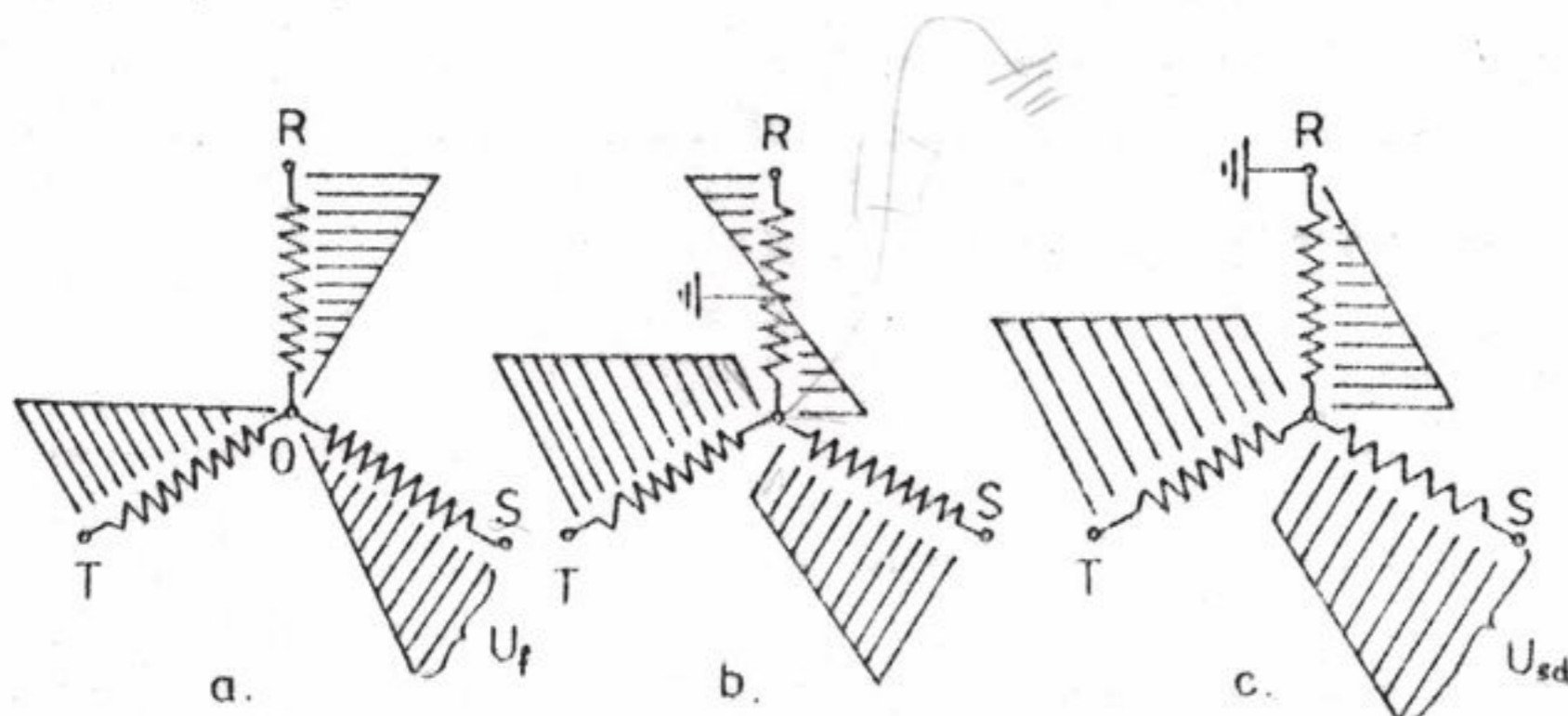
- Podle velikosti chráněného stroje.

- Podle způsobu zapojení alternátoru do soustavy.
- Podle ochrany souvisejících zařízení a jejich vzájemné součinnosti.

Alternátory mohou pracovat buď přímo do sítě, nebo přes blokový transformátor; vlastní potřeba výrobního bloku je napájena přes transformátor vlastní spotřeby. Některé ochrany jsou společné pro všechna tato zařízení (alternátor, transformátor), např. ochrana rozdílová. Další ochrany musí chránit alternátor také před nepříznivými vlivy přicházejícími ze sítě, např. při nesouměrném zatížení. Také při poruše v budícím obvodu je třeba, aby reagovala ochrana přímo u alternátoru a rozlišovala poruchové stavy od provozních. Ochrany alternátoru musí také respektovat některé poruchové stavy pohánějící turbíny.

Ochrana při zemních spojení ve statoru alternátoru

Při porušení izolace statorového vinutí alternátoru a průrazu na kostru stroje vzniká zemní spojení a na uzlu alternátoru se objeví napětí, jehož velikost je dána místem zemního spojení, jak je uvedeno na obr. 3.29.



Obr. 3.29. Zemní spojení alternátoru

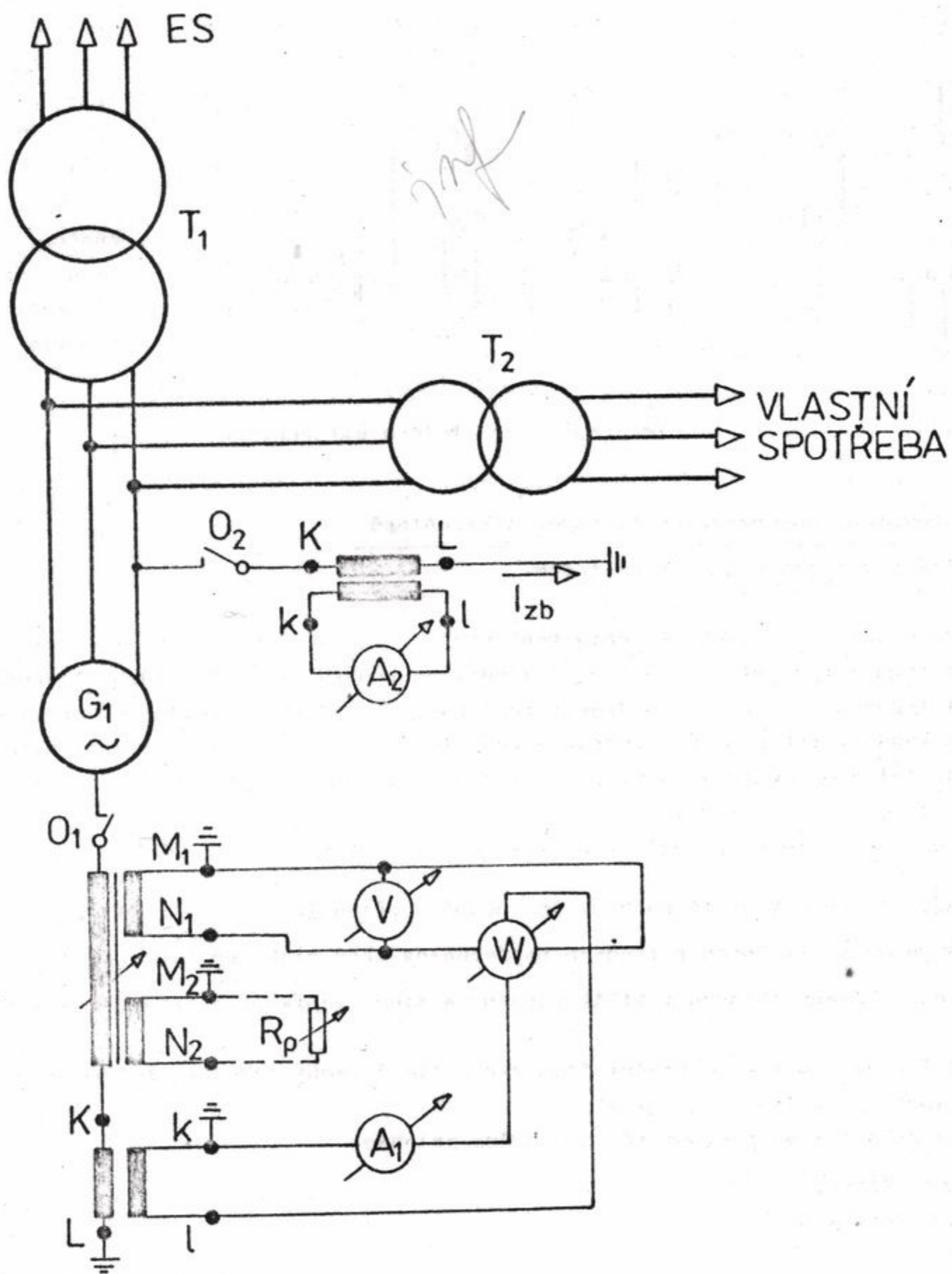
Uzel alternátorů (u větších jednotkových výkonů) se spojuje se zemí přes indukčnost, aby byl zemní proud kompenzován. Nastane-li zemní spojení u vývodu alternátoru, dosahuje poruchové napětí hodnoty napětí fázového; je-li místo zemního spojení blíže k uzlu alternátoru, zmenšuje se hodnota poruchového napětí úměrně se vzdáleností, jak je znázorněno na obr. 3.29 při:

- a/ bezporuchovém stavu,
- b/ zemním spojení uprostřed vinutí,
- c/ zemním spojení u vývodu alternátoru

Alternátor pracuje do sítě přes blokový transformátor

Pracuje-li alternátor do sítě přes blokový transformátor, je od sítě galvanicky oddělen a velikost napětí mezi nulovým bodem a zemí je spolehlivým údajem pro činnost ochrany při zemním spojení. Zemní proud, který se uzavírá přes statorové plechy nemá přesáhnout hodnotu 3 A, aby v místě poruchy nedošlo k propálení izolace statorových plechů. Relé musí být citlivé pouze na napětí základní harmonické, protože vyšší harmonické by je mohly uvést nesprávně v činnost. Schema zapojení je na obr. 3.30.

Laděním tlumivky se nastaví nejmenší hodnota zbytkového proudu podle ampérmetru A₂ podle obr. 3.31



Obr. 3.31. Zapojení pro ladění tlumivky metodou přímou

Pro výpočet činné složky zbytkového proudu pomocí wattmetru platí :

$$I_{zb} (w) = \frac{P_{zb}}{U_{tl}} \quad [A; W; V] \quad (3.32)$$

kde :

P_{zb} ... zbytkový výkon měřený wattmetrem [W]

U_{tl} ... napětí na tlumivce [V]

Hodnota činného zbytkového proudu má být větší než 5 % proudu protékajícího tlumivkou při rezonanci:

$$I_{zb} > 0,05 I_{tl} \text{ (res)} \quad (3.33)$$

Dále mají být při správném naladění tlumivky splněny tyto podmínky :

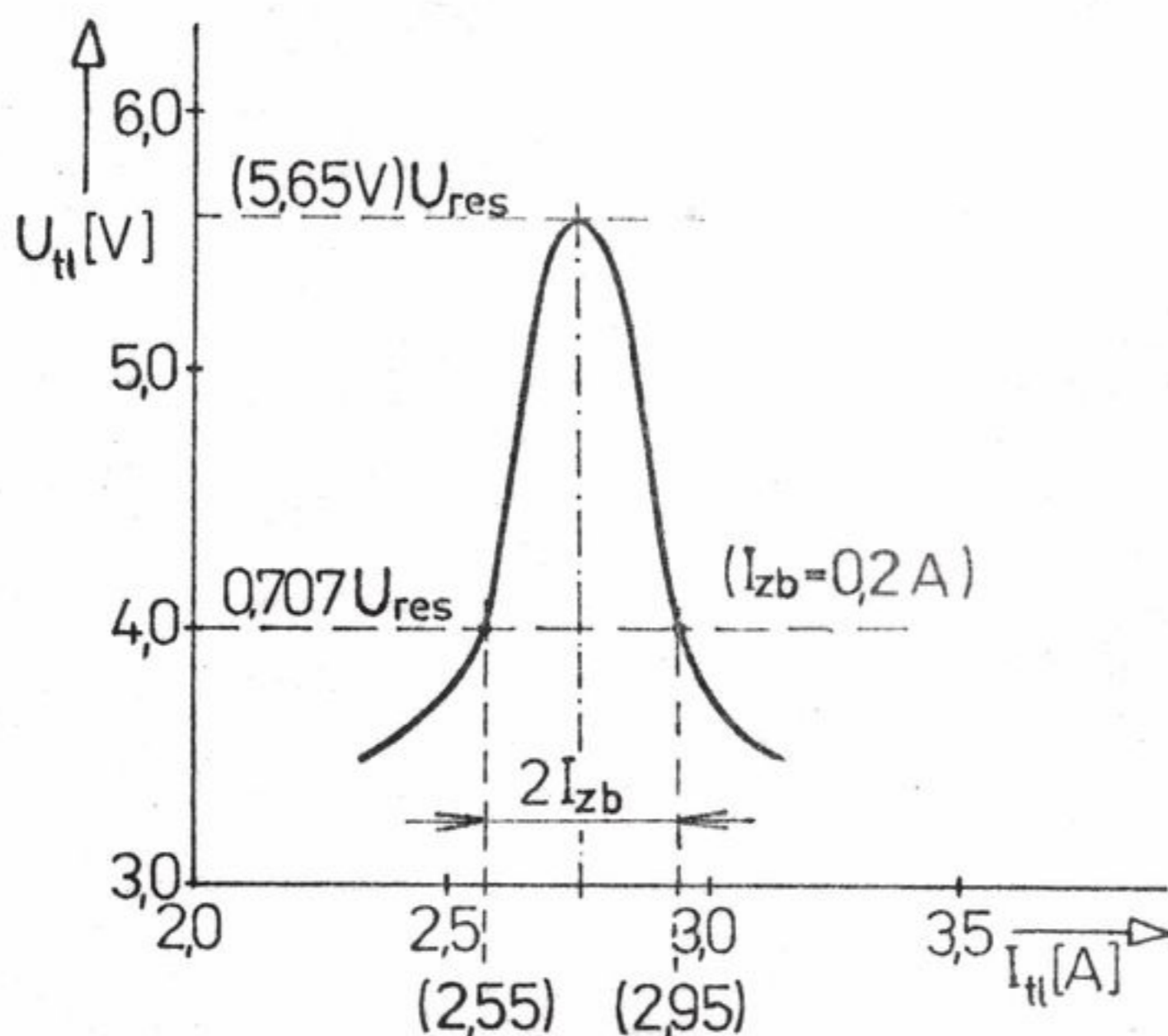
- zbytkový proud (I_{zb} - měřený v obvodu umělého zemního spojení na výstupu alternátoru) nemá přesáhnout hodnotu 1,5 A ,
- laděný obvod má mít induktivní charakter, tzn., že proud zhasí tlumivkou se nastaví na hodnotu proudu o 5 až 20 % vyšší než je hodnota proudu při dosažení maximálního, rezonančního napětí.

Ladění tlumivek přímou metodou je přesný způsob pro určení rezonančního stavu . Průběh zbytkového proudu je konvexní křivka s výrazným minimem při rezonanci. Připojení přidavného odporu R_p neovlivní rezonanci, ovlivní pouze velikost činné složky zbytkového proudu.

Metoda nepřímá

Při určení vyladěného stavu sledovaného obvodu nepřímou metodou není provedeno umělé zemní spojení. Při nabuzeném, případně i zatíženém stroji (přifázoveném na vnější síť) se měření získají údaje pro určení rezonance, a údaje pro zjištění činné složky zbytkového proudu. Napětí na tlumivce měříme voltmetrem připojeným na měřicí transformátor napětí tlumivky. Proud odečítáme na mechanickém ukazateli tlumivky. Tato hodnota představuje proud, který by tlumivkou protékal v případě zemního spojení na výstupu některé fáze alternátoru. Na základě získaného dostatečného počtu měřených hodnot sestrojíme rezonanční křivku vyjádřenou v rozmezí 40 ÷ 100 % rezonančního (maximálního) napětí.

Rezonanční křivka je nakreslena na obr. 3.32



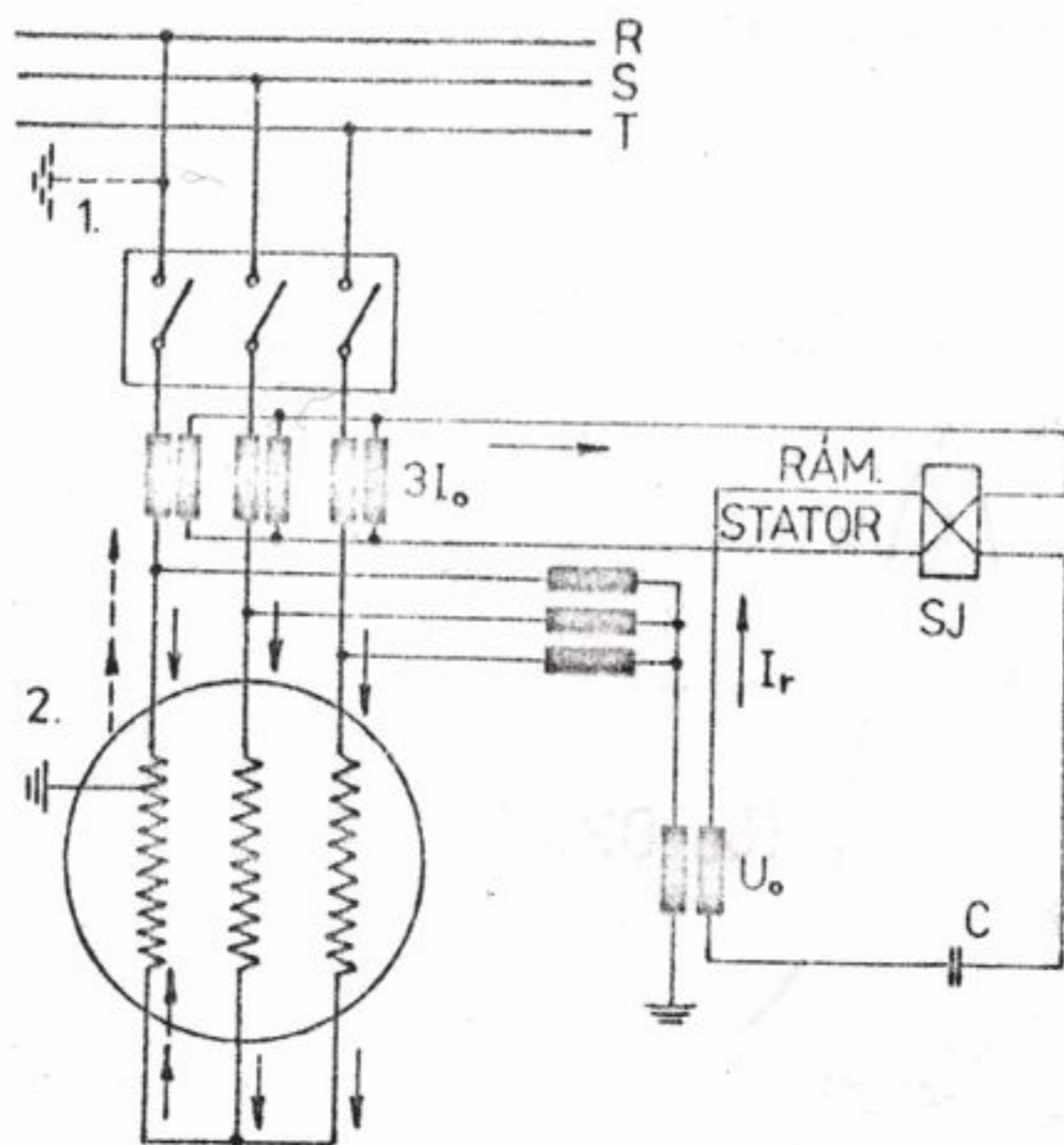
Obr. 3.32. Ladění tlumivky nepřímou metodou podle rezonanční křivky

Na hladině napětí $70,7\% U_{res}$ vedeme rovnoběžku s vodorovnou osou, na kterou vynášíme proud procházející tlumivkou. V místě průsečíků této přímky se sestrojenou rezonanční křivkou dostaneme dva body jejichž vzájemná vzdálenost odpovídá dvojnásobné hodnotě zbytkového proudu $2I_{zb}$. V případě, že se v měřeném obvodu vyskytují vyšší harmonické (obvykle převažuje 3. harmonická) dostaneme zkreslenou rezonanční křivku. Je proto třeba použít voltmetr, který je vybaven filtrem propouštějícím základní harmonickou a omezující vyšší harmonické. Obsah vyšších harmonických je závislý na stupni vyladění tlumivky. Při ladění tlumivky uměle zvětšujeme proud procházející mezi uzlem alternátoru a zemí a může proto dojít k působení zemní ochrany statoru (i při bezporuchovém stavu stroje). Protože se tento postup ladění tlumivky provádí při plném zatížení alternátoru, je třeba zabránit nesprávnému působení ochrany.

Ladění tlumivky metodou nepřímou je nutno považovat jako metodu orientační a metodu kontrolní během provozu.

Alternátor pracuje přímo na přípojnic

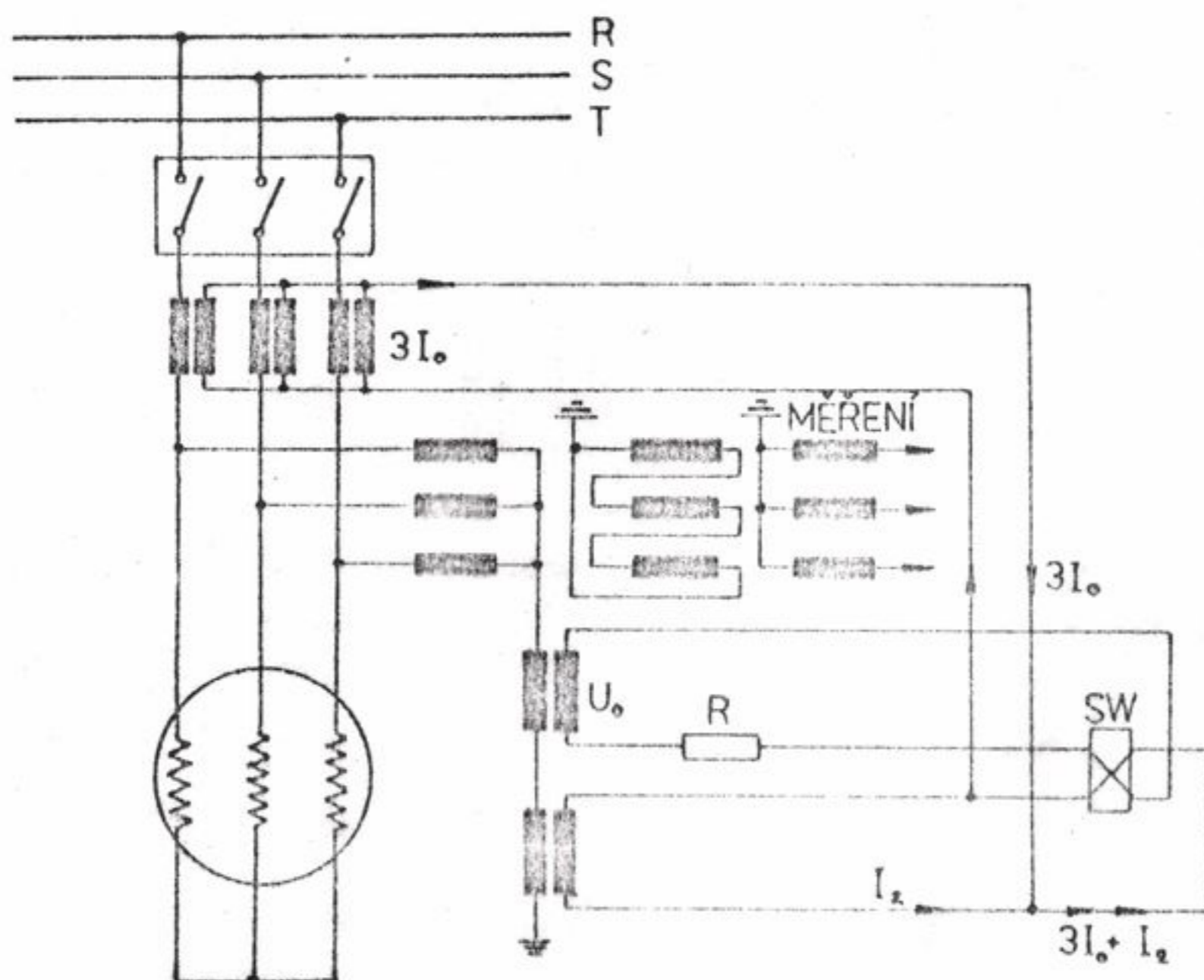
Je-li spojen alternátor přímo se sítí, nemůžeme použít proudové, nebo napěťové indikace zemního spojení ve statoru alternátoru, protože zemní spojení v síti způsobí také průchod proudu přes nulu alternátoru. Je proto nutné určit směr zemního proudu, což se provádí obvykle wattmetrickým článkem. Jeho proudová cívka je napájena proudem $3I_0$, který získáme ze součtového řazení transformátorů proudu. Napětí nulové složky získáme mezi nulovým bodem transformátorů napětí zapojených do hvězdy a zemí. Měření proudů a napětí je nutno zařadit mezi svorky alternátoru a přípojnic. Zapojení a funkce zemní ochrany je znázorněno na obr. 3.33.



Obr. 3.33. Ochrana při zemním spojení alternátoru, pracujícím přímo do přípojnic

Pracuje-li alternátor do kompenzované sítě, je výsledný proud protékající zemním spojením malý a pro zjištění poruchy ochranou nepostačující. Je proto nutné tento proud

v obvodu ochrany uměle zvětšit a to tak, že sčítáme proudy nulové složky $3I_0$ s proudem I_z , jak je uvedeno na obr. 3.34. Takový proud je pak dostatečný pro spolehlivou funkci wattmetrického člénku.



Obr. 3.34. Ochrana při zemním spojení alternátoru pracujícím do kompenzované sítě

Ochrana při zemním spojení rotoru alternátoru

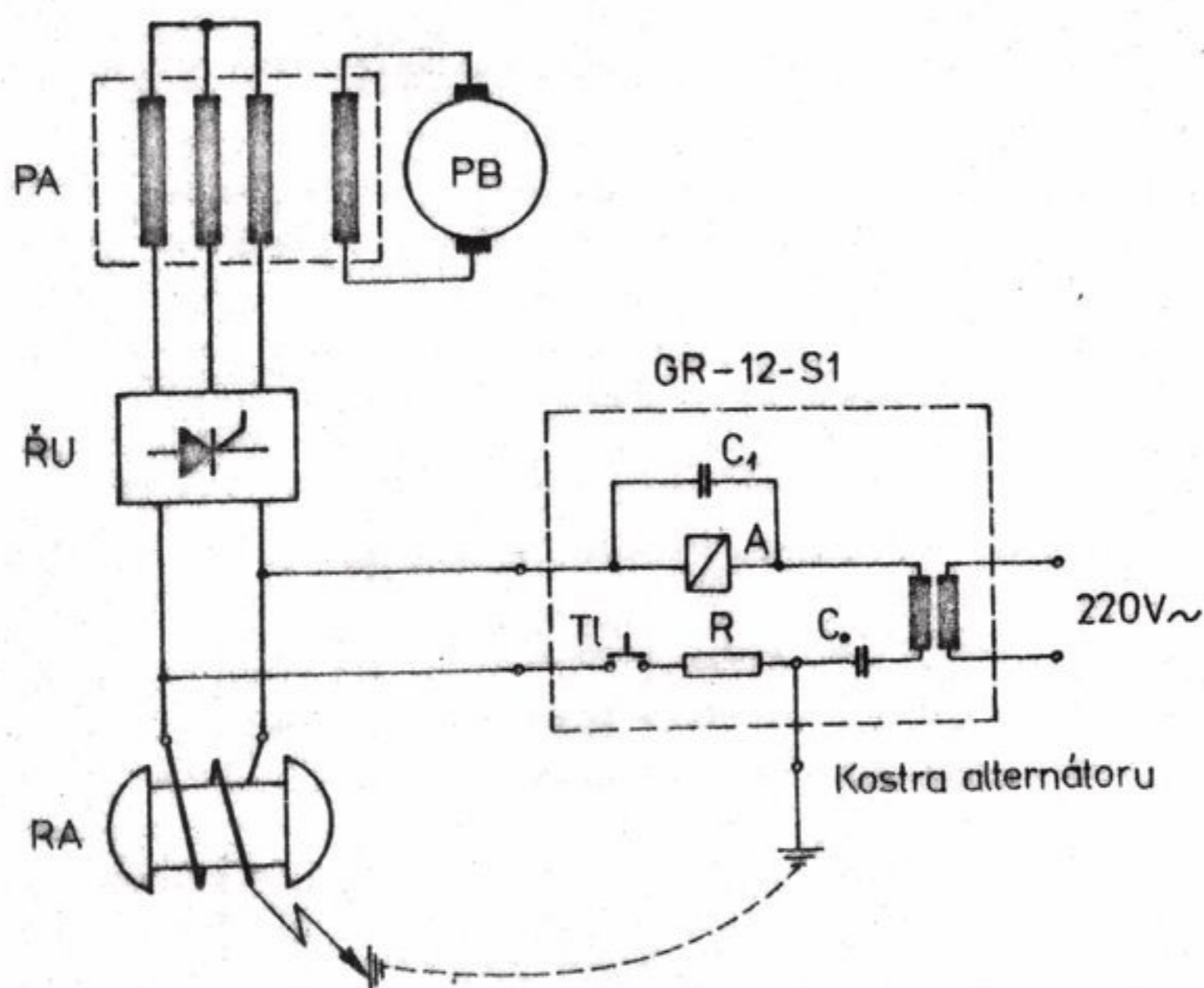
Alternátory velkých jednotkových výkonů jsou buzeny pomocí řízeného tyristorového usměrňovače, který je napájen z pomocného trojfázového alternátoru jak je znázorněno na obr. 3.35.

Izolace budicího vinutí je namáhána tepelně - Jouleovými ztrátami procházejícího budicího proudu. Dále se mohou vyskytnout přídatné ztráty v rotoru alternátoru od nesouměrného zatížení nebo vířivých proudů uzavírajících se v tělese rotoru.

Tato izolace je pak také namáhána mechanicky a to působením odstředivých sil, rázy při přechodných jevech a také dilatcemi při rychlých změnách teplot v různých částech rotoru. Při regulaci budicího proudu může dojít ke vzniku napěťových špiček, které se mohou nepříznivě projevit ve slabších místech izolace. Pokud dojde k jednoduchému zemnímu spojení budicího vinutí (spojení na kostru stroje) není provoz stroje bezprostředně ohrožen.

Teprve při druhém zemním spojení, kdy vzniká magnetická nesymetrie rotoru (část vinutí je dvěma spojeními na kostru vykrácena) mohou následným jednostranným tahem vzniknout nebezpečné vibrace rotoru a případná havarie stroje. Je proto třeba stroj s jedním zemním spojením co nejdříve opravit, aby se uvedená porucha nemohla vyskytnout.

Pokud stroj s jedním zemním spojením zůstane i nadále v provozu, je třeba k němu připojit další ochranu (GR 21), která alternátor při výskytu druhého zemního spojení odpojí od sítě a odstaví z provozu. Činnost této ochrany může být buď mžiková, nebo zpožděná a to z toho důvodu, aby ochrana nepůsobila nesprávně při přechodových stavech. Ochrana při druhém zemním spojení rotoru alternátoru lze velmi těžko seřídít při zemním spojení na začátku

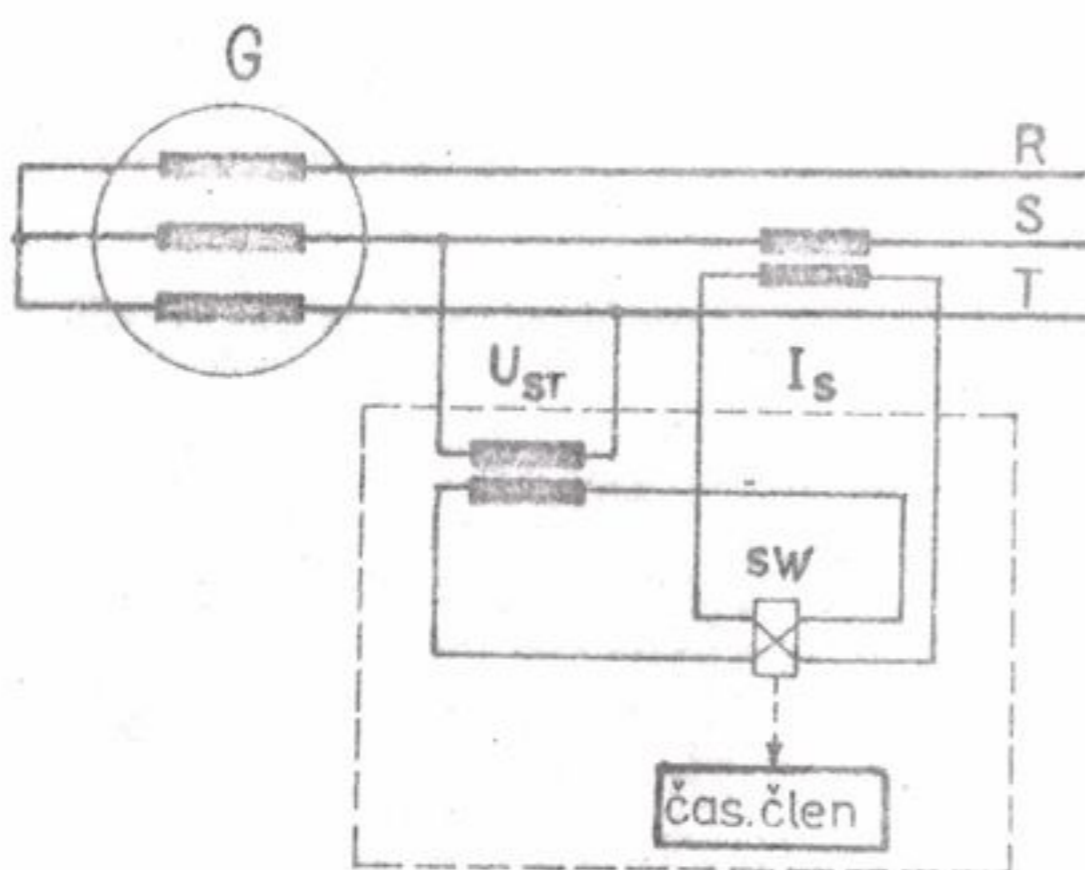


Obr. 3.35. Ochrana při zemním spojení rotoru alternátoru

vinutí nebo přímo na sběracím ústrojí, kde jsou poruchy časté. Ochrana při druhém zemním spojení pak zastupuje ochrana při zvýšených vibracích stroje (vibrační detektor). Dnes užívaná ochrana při prvním zemním spojení rotoru alternátoru - obr. 3.35. typového označení GR 12 - S1 pracuje na principu hlídání stavu izolace přiloženým střídavým napětím. Pomocný obvod je v jednom bodě spojen s kostrou alternátoru, jedna jeho větev je připojena přes proudové relé A přímo s budícím obvodem alternátoru. Druhá větev, která obsahuje oddělovací kondenzátor C_0 a omezovací odpor R, je v normálním stavu rozpojena kontakty kontrolního tlačítka Tl. Při vzniku zemního spojení některého bodu budícího vinutí, nebo při stisknutí kontrolního tlačítka se obvod uzavře, přes relé A projde proud, relé spíná a dává signalizační impuls. Ochrana musí být necitlivá na vyšší harmonické, které se při regulaci mohou objevit, pracují-li v budícím obvodu řízené usměrňovače. Tato necitlivost je zajištěna přidáním kondenzátoru C_1 paralelně k cívice relé A.

Zpětné wattové ochrana alternátoru

Při náhlém výpadku výkonu turbíny, která pohání alternátor, může alternátor pracovat jako synchronní motor a začne pohánět turbínu. Aby se zabránilo vzniku možných poškození turbíny, která takto přestala normálně pracovat, odepíná se po časovém odstupu alternátor od sítě. Tento časový interval se pohybuje v rozmezí několika sekund. Vlastní zpětná wattové ochrana hlídá směr toku činné energie sledováním veličin napětí a proudu na svorkách alternátoru. Měřicím článkem je citlivé elektrodynamické relé. Dále je ochrana vybavena časovým článkem pro nastavení požadovaného časového odstupu k vyslání vypínacího impulsu. Zapojení ochrany GSCT 11 je na obr. 3.36. Činnost zpětné wattové ochrany je blokována ochranami turbíny při spouštění.



Obr. 3.36. Zpětná wattová ochrana alternátoru

Ochrana alternátoru při zvýšeném napětí

Při provozu alternátoru mohou nastat případy, kdy napětí na svorkách alternátoru vzroste nad přípustnou mez. Zvýšené napětí by mohlo vyvolat porušení izolace alternátoru i ostatních zařízení. Příčinou náhlého vzrůstu napětí může být odpojení zatíženého alternátoru od sítě, takže dojde k jeho rychlému odlehčení. Budicí proud, který byl nastaven pro určité zatížení, způsobí po odpojení stroje od sítě rychlý vzrůst napětí na svorkách.

Vlastní ochranu tvoří napěťové relé, které je vybaveno časovým článkem pro nastavitelné zpoždění vypínacího impulsu.

Distanční ochrana alternátoru

Při zkratu vně alternátoru má působit podle zavedených zvyklostí nadproudá ochrana s časovým zpožděním, blokována podpěťovou ochranou. Podpěťový článek zajišťuje selektivní působení ochrany tak, že při blízkém zkratu u alternátoru poklesne napětí a ochrana působí, naopak při vzdáleném zkratu je pokles napětí malý a podpěťový článek blokuje činnost ochrany. V mnoha případech se stávalo, že ochrana nepůsobila správně, to znamená, že v prvním okamžiku zkratu zareaguje na zvýšení proudu, ale před uplynutím nastaveného času odpadne. Tento jev je dán poklesem proudu alternátoru při zkratu, kdy ustálená složka proudu bude menší než nastavený nadproud ochrany. Z těchto důvodů je v současné době u alternátorů instalována zkratová ochrana impedančního principu, která je připojena na transformátory napětí na svorkách a na transformátory proudu v uzlu alternátoru. Charakteristika měřícího členu je kruhová se středem v počátku, ochrana pracuje ve dvou stupních, každý stupeň má tři systémy měření:

I. stupeň svým impedančním nařízením zasahuje do 85 % reaktance blokového transformátoru. Časové působení by mělo být asi 40 až 50 ms jako záloha při působení rozdílových ochran bloku, jejichž čas náběhu je 30 až 40 ms.

II. stupeň má mít poměrně značný dosah měřené impedance, neboť se nařizuje až na přípojnice rozvodny, do které je vyveden výkon alternátoru. Časové nastavení druhého stupně je nutné volit až několik sekund tak, aby podle konkrétní situace byl zajištěn dostatečný časový odstup od základních časů ochran blokového vedení.

Zkratová ochrana alternátoru s impedančním měřením má tedy za úkol zálohovat činnost rozdílových ochran alternátoru, blokového transformátoru a celého bloku a dále pak zálohovat ochrany blokového vedení až na přípojnice rozvedny.

Nastavení distanční ochrany alternátoru

I. stupeň se nastavuje na 85 % impedance blokového transformátoru podle vztahu :

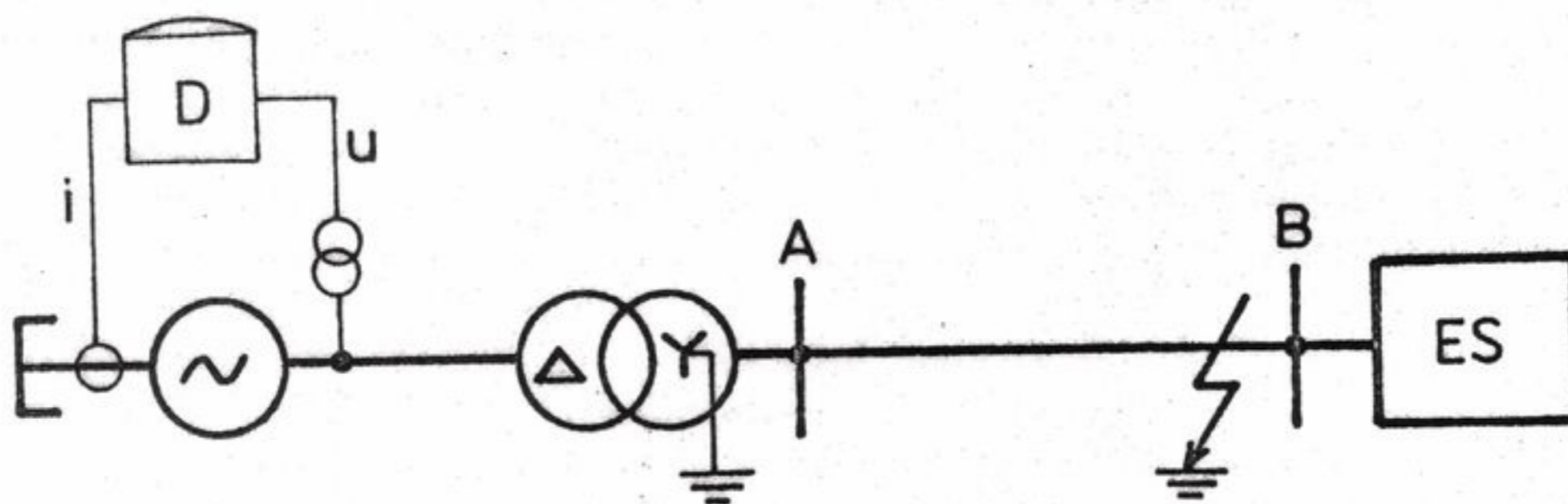
$$x_{rI} = 0,85 u_{k\%} \cdot \frac{I_1 \cdot U_n}{I_n \cdot U_1} \quad [\%] \quad (3.34)$$

kde :

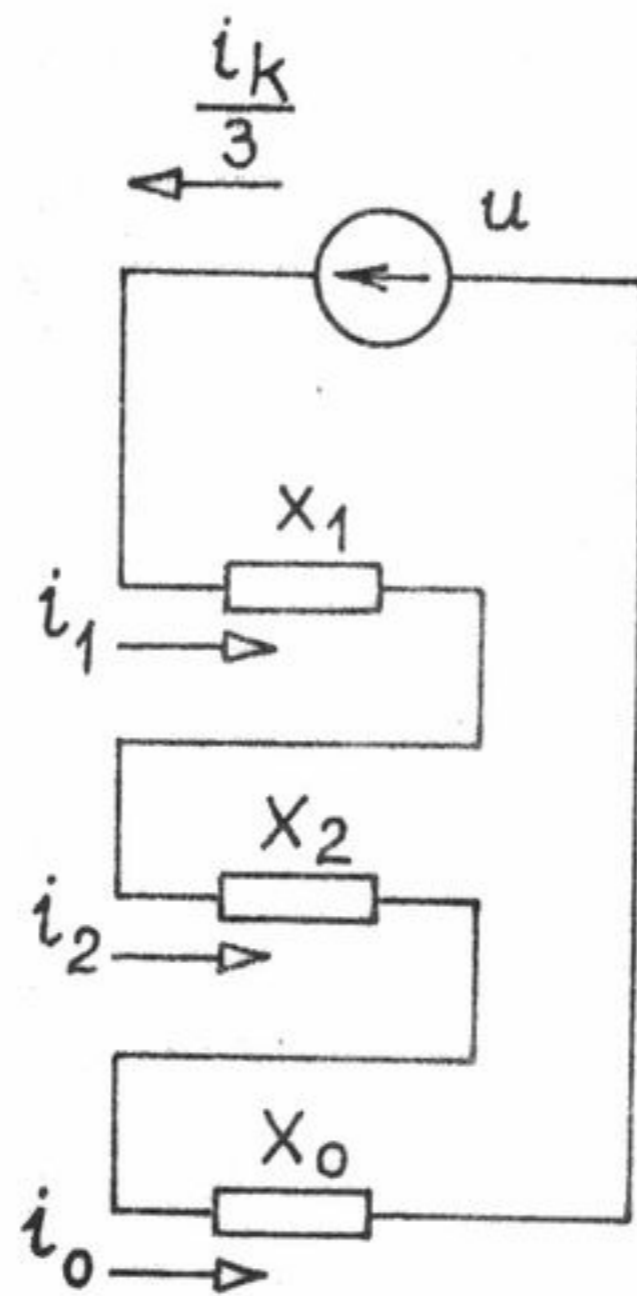
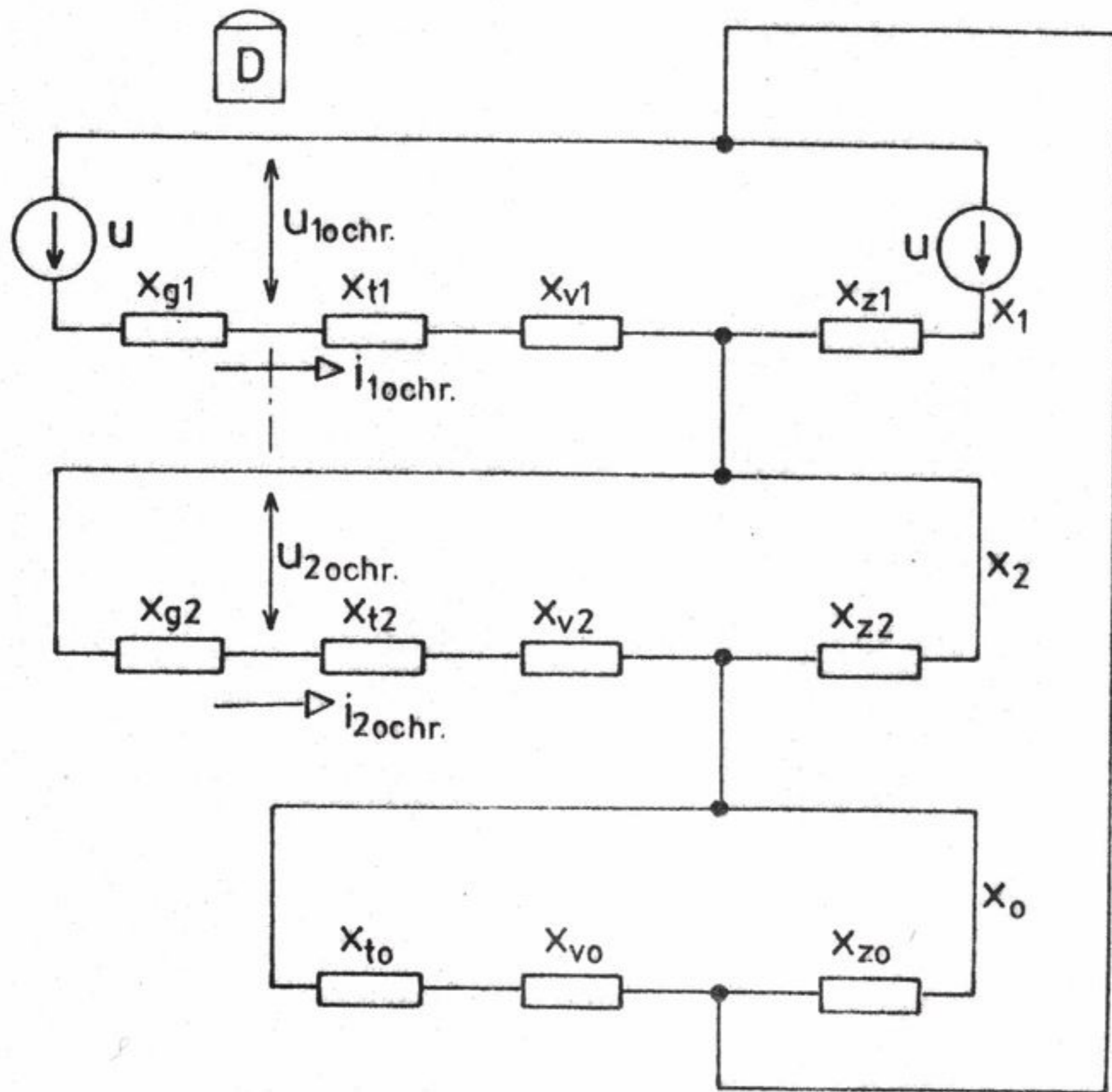
| | | | |
|-----------|-----|--|------|
| x_r | ... | procentní hodnota nastavení I. stupně | |
| $u_{k\%}$ | ... | napětí nakrátko blokového transformátoru | [%] |
| I_1 | ... | jmenovitý primární proud FTP | [kA] |
| U_1 | ... | jmenovité primární napětí PTN | [kV] |
| I_n | ... | jmenovitý proud blokového transformátoru na straně alternátoru | [kA] |
| U_n | ... | jmenovité napětí alternátoru | [kV] |

II. stupeň se nastavuje podle poměrů při zkratu na přípojnicích rozvedny vvn, kdy uvažujeme plný příspěvek zkratového proudu z elektrizační soustavy. Distanční ochrana alternátoru, umístěná na straně vn měří zkraty na systému vvn s rozdílnou přesností podle druhu zkratu. Odpovídající měření provádí pro třípólový zkrat na straně vvn, ostatní druhy zkratů zvláště jednopólový zkrat měří ochrana jinak než odpovídá skutečnosti. Z tohoto hlediska by bylo vhodné, aby ochrana měřila pouze souslednou a zpětnou složku proudu a napětí, což by bylo splněno při zapojení ochrany na sdružené proudy a napětí.

Potřebné parametry a stanovení náhradních reaktancí sítě, přenosového vedení, blokového transformátoru a alternátoru byly uvedeny v kapitole "Nastavení zemní ochrany nádoby transformátoru". Situace pro výpočet poměrů při jednopólovém zkratu na konci blokového vedení u přípojnic protilehlé rozvedny je znázorněna na obr. 3.37. a. a 3.37. b.



Obr. 3. 37. a. Jednopólové schéma bloku a vedení vvn



Obr. 3. 37. b. Náhradní a zjednodušené schéma pro výpočet zkratových poměrů

V náhradním schéma značí :

- X_g ... reaktance alternátoru
- X_t ... reaktance blokového transformátoru
- X_v ... reaktance vedení
- X_z ... náhradní reaktance soustavy
- index 1 ... sousledná složka
- index 2 ... zpětná složka
- index 0 ... nulová složka

Pro poměrné hodnoty složkových proudů při jednopólovém zkratu platí :

$$i_1 = i_2 = i_0 = \frac{u}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{i_k}{3} \quad (3.35)$$

Souledná složka reaktance :

$$X_1 = \frac{X_{z1}(X_{g1} + X_{t1} + X_{v1})}{X_{z1} + X_{g1} + X_{t1} + X_{v1}} = M(X_{g1} + X_{t1} + X_{v1}) \quad (3.36)$$

$$\text{kde } M = \frac{X_{z1}}{X_{z1} + X_{g1} + X_{t1} + X_{v1}}$$

Zpětná složka reaktance :

$$X_2 = \frac{X_{z2}(X_{g2} + X_{t2} + X_{v2})}{X_{z2} + X_{g2} + X_{t2} + X_{v2}} = N(X_{g2} + X_{t2} + X_{v2}) \quad (3.37)$$

$$\text{kde } N = \frac{X_{z2}}{X_{z2} + X_{g2} + X_{t2} + X_{v2}}$$

Sousledná složka reaktance :

$$X_0 = \frac{X_{z0}(X_{t0} + X_{v0})}{X_{z0} + X_{t0} + X_{v0}} = \sigma(X_{t0} + X_{v0}) \quad (3.38)$$

$$\text{kde } \sigma = \frac{X_{z0}}{X_{z0} + X_{t0} + X_{v0}}$$

Složkové proudy v místě ochrany (podle náhradního schéma na obr. 3.37b)

$$\left. \begin{aligned} i_{1 \text{ ochr.}} &= \frac{i_k}{3} M \\ i_{2 \text{ ochr.}} &= \frac{i_k}{3} N \\ i_{0 \text{ ochr.}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.39)$$

Složková napětí v místě ochrany (podle náhradního schéma na obr. 3.37b)

$$\left. \begin{aligned} u_{1 \text{ ochr.}} &= u - \frac{i_k}{3} \cdot M X_{g1} \\ u_{2 \text{ ochr.}} &= - \frac{i_k}{3} N \cdot X_{g2} \\ u_{0 \text{ ochr.}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

Vstupní (fázový) proud ochrany (fáze R) :

$$i_{R \text{ ochr.}} = i_{1 \text{ ochr.}} + i_{2 \text{ ochr.}} = \frac{1_k}{3} (M + N) \quad (3.41)$$

Vstupní (fázové) napětí ochrany (fáze R) :

$$u_{R \text{ ochr.}} = u_{1 \text{ ochr.}} + u_{2 \text{ ochr.}} = u - \frac{1_k}{3} (M X_{g1} + N X_{g2}) \quad (3.42)$$

Reaktance měřená ochranou (pro fázi R) :

$$X_{R \text{ ochr.}} = \frac{M (X_{t1} + X_{v1}) + N (X_{t2} + X_{v2}) + \sigma (X_{to} + X_{vo})}{M + N} \quad (3.43)$$

Pro daný případ platí :

$$\begin{aligned} X_{t1} &= X_{t2} = X_{to} = X_t \\ X_{v1} &= X_{v2} = X_v = \frac{1}{k_{vo}} X_{vo} \end{aligned} \quad (3.44)$$

kde :

$$k_{vo} = \frac{X_{vo}}{X_{v1}} = 3$$

Výraz (3.43) zjednodušíme :

$$X_{R \text{ ochr.}} = X_t + X_v + \frac{\sigma}{M + N} \cdot (X_t + k_{vo} X_v) \quad (3.45)$$

V případě, že alternátor není připojen na velkou elektrizační soustavu, pak platí :

$$\left. \begin{aligned} X_{z1} &= X_{z2} = X_{zo} = \infty \\ M &= N = \sigma = 1 \end{aligned} \right\} \quad (3.46)$$

V důsledku toho ochrana měří reaktanci :

$$X_{R \text{ ochr.}} = \frac{1}{2} (3 X_t + 5 X_v) \quad (3.47)$$

Nastavení druhého stupně ochrany

$$X_{rII.} = k_b \left[X_t + X_v + \frac{\sigma}{M + N} (X_t + k_{vo} X_v) \right] \cdot \frac{I_1}{I_n} \cdot \frac{U_n}{U_1} \quad (3.48)$$

$k_b = 1,3$ (koeficient bezpečnosti)

Tento vztah platí pro jeden alternátor, pracující do jednoho vedení.

Pracuje-li n alternátorů do jednoho vedení, pak platí :

$$X_{rII.}^{(n)} = k_b \left[X_t + n X_v + \frac{\sigma}{M + N} (X_t + n k_{vo} X_v) \right] \cdot \frac{I_1 \cdot U_n}{I_n \cdot U_1} \quad (3.49)$$

Dosah měření impedanční zkratové ochrany alternátoru za blokovým transformátorem při troj-
pólovém zkratu na straně vvn :

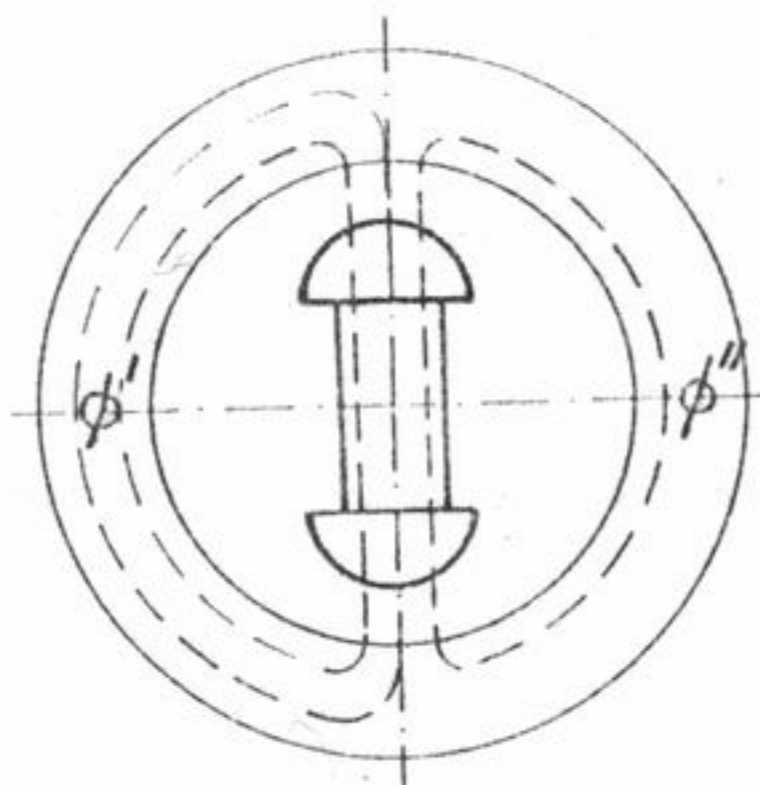
$$X_{dos.} = \left(X_{rII} \cdot \frac{I_n \cdot U_l}{I_l \cdot U_n} - X_t \right) \cdot \frac{U_s^2}{S_t} \quad [\Omega] \quad (3.50)$$

kde :

U_s ... napětí sítě na straně vvn [kV]
 S_t ... zdánlivý jmenovitý výkon blokového transformátoru [MVA]

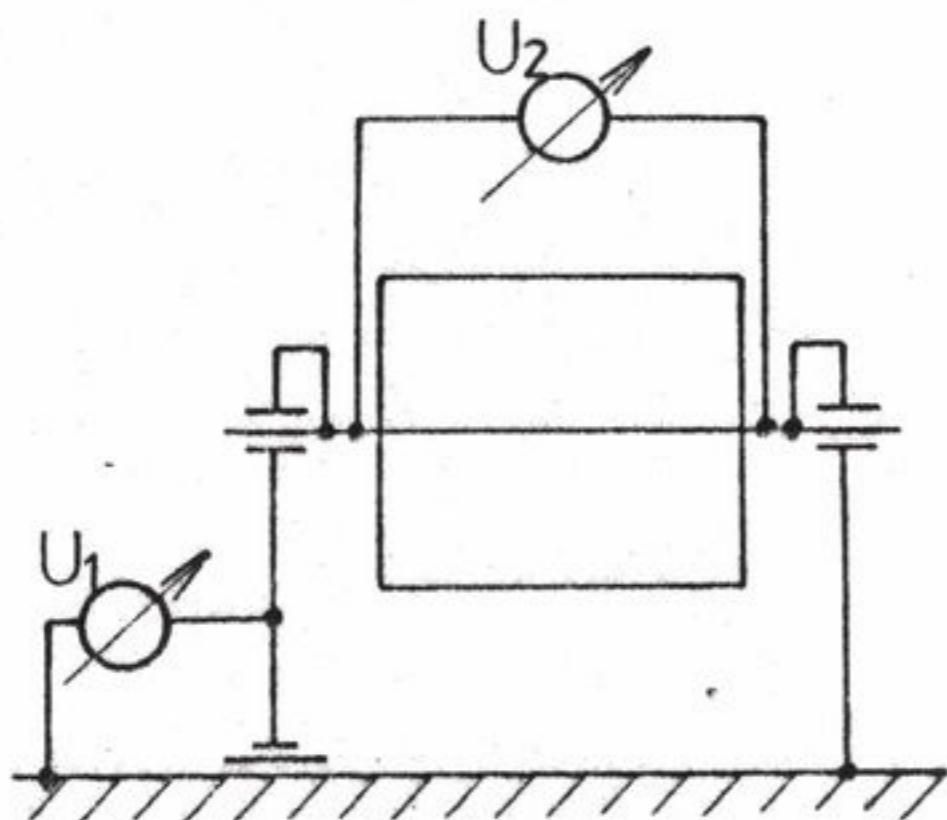
Ložiskové proudy alternátoru

Magnetická nesouměrnost alternátoru může být způsobena buď rozdílným magnetickým odporem v obvodu statoru, například vytvořením mezery ve styku segmentů aktivního železa nebo nestejnou velikostí vzduchové mezery mezi rotorem a státorem, způsobenou excentrickým uložením rotoru. V důsledku magnetické nesymetrie se vytvoří nestejně magnetické toky ϕ' a ϕ'' jak je naznačeno na obr. 3.38.



Obr. 3.38. Alternátor s magnetickou nesymetrií

Při otáčení rotoru se velikost magnetického toku v obou částech statoru periodicky mění, což má za následek vznik indukovaných napětí a proudů v masivních částech statoru. Indukované napětí, které se ve statoru indukuje vlivem nesouměrnosti odporu cest magnetického toku, může dosahovat hodnoty několika voltů, proudy uzavírající se přes hřídel stroje, ložiska, ložiskové stojany a rám stroje by mohly dosahovat hodnot až tisíc ampér. Následkem protékání střídavého proudu přes ložiska může dojít při vysokých proudových hustotách k elektrochemické korozi hřídele a výstelky ložiska, případně by mohly nastat případy vzniku popálených míst. Ochranou proti vzniku ložiskových proudů je odizolování jednoho stojanu (jednoho konce hřídele stroje) od základů. Odizolování musí být provedeno na všech vodivých zařízeních, které by mohly uzavírat obvod ložiskových proudů jako jsou například olejová potrubí, teploměry, obvody pro měření a podobně. Izolační odpor má být v provozním stavu minimálně $1M\Omega$. Měření kvality izolace stojanu lze provést i za provozu turboalternátoru způsobem naznačeným na obr. 3.39.

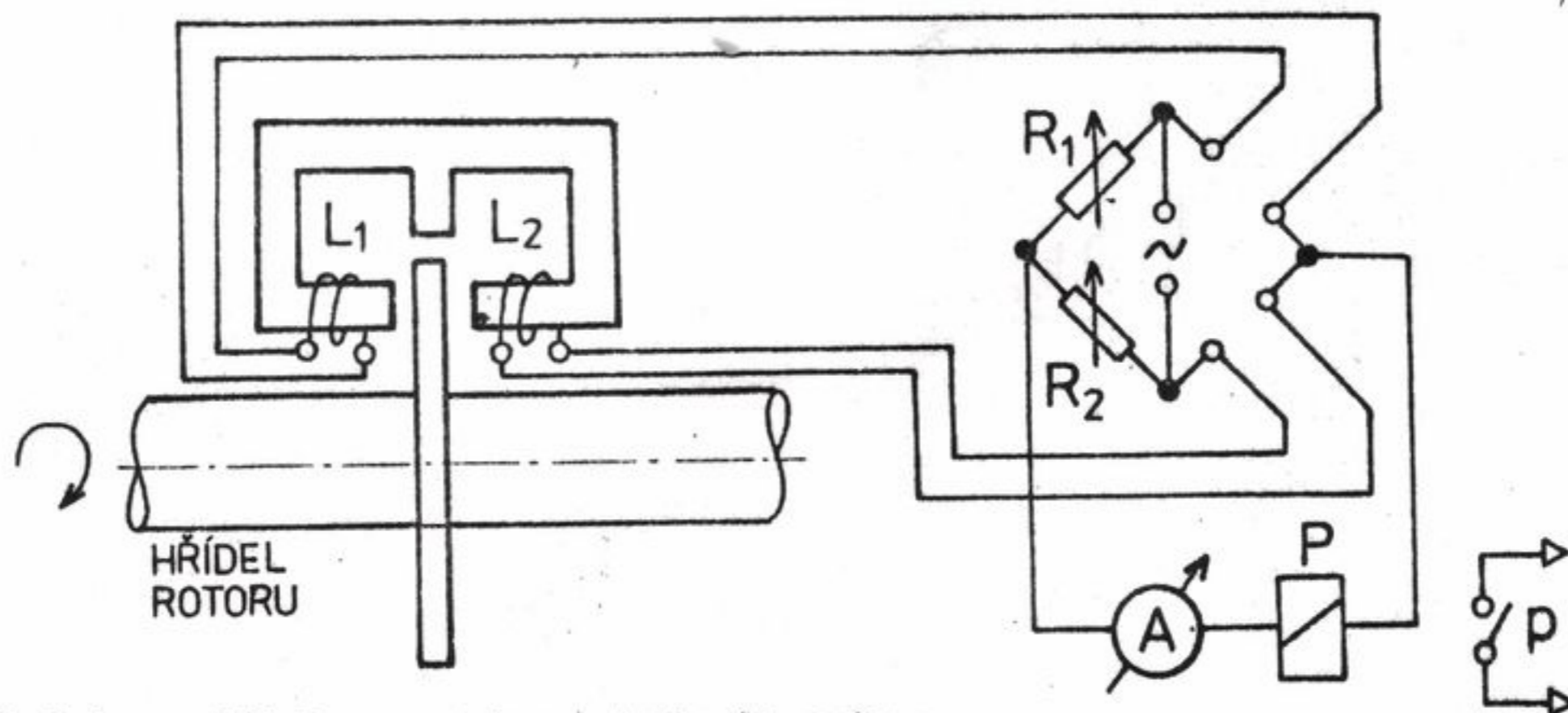


Obr. 3.39. Měření kvality izolace stojanu alternátoru

Před měřením je nutno vodivě překlenout izolační vrstvu vytvořenou olejovým filmem ložiska, aby nedošlo ke zkreslení výsledků měření. Je-li izolace ložiskového stojanu v pořádku a ložiskové proudy neprotékají, jsou naměřená napětí U_1 a U_2 stejná. Dojde-li k porušení izolace, protékají přes hřídel stroje ložiskové proudy a vytváří na něm úbytek napětí, takže napětí U_2 bude větší než U_1 . Izolační stav ložiskových stojanů se kontroluje po generálních opravách před najížděním alternátoru.

Ochrana při posunu rotoru turboalternátoru

Posun rotoru alternátoru i turbíny může způsobit poškození rotujících stabilních částí obou strojů. Sledování polohy rotoru je provedeno detektory, které se umísťují na hřídel turbíny a alternátoru, mezi jednotlivé stupně turbíny a mezi turbínu a alternátor. Zařízení pro detekci posunu rotoru obsahuje čidlo polohy, které pracuje na principu změny magnetické symetrie při posunu rotoru. Na obr. 3.40 je nakresleno toto zařízení, které sestává z ocelového kotouče, nasazeného na hřídeli, který se otáčí mezi dvěma pólovými nástavci, na kterých jsou navinuty cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 . Změna indukčnosti způsobená změnou vzduchové mezery při posuvu rotoru se vyhodnocuje měřicím můstkem ochrany.

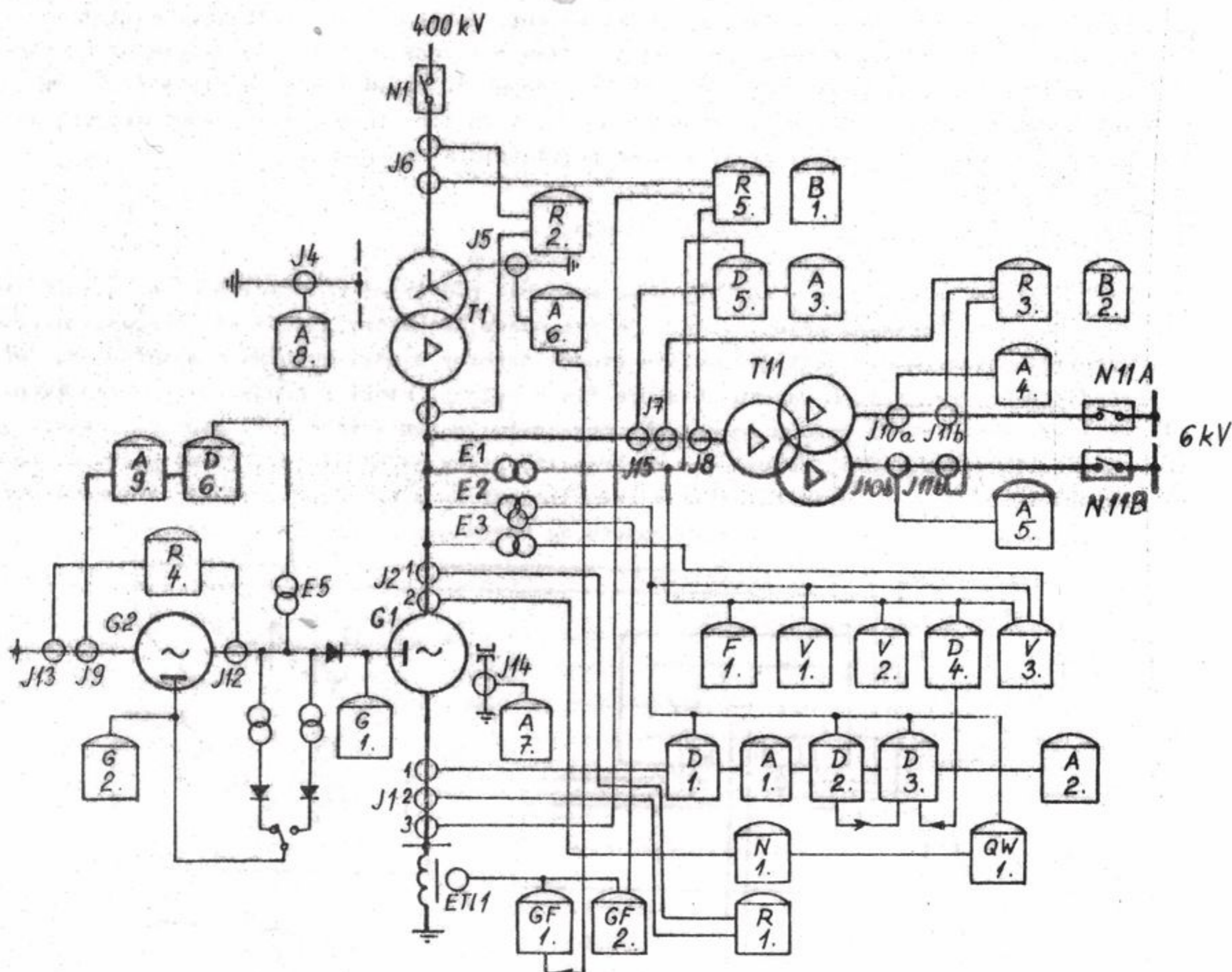


Obr. 3.40. Ochrana při posuvu rotoru turboalternátoru

Vyrovnaný stav měřicího můstku nastavíme axiálním posuvem elektromagnetického čidla do symetrické polohy vůči kotouči na hřídeli rotoru a doladíme jej odpory R_1 a R_2 . Při posuvu rotoru vzniká nesymetrie indukčností L_1 a L_2 , vyrovnávací proud protéká přes proudové relé P , které při překročení nařizené proudové hodnoty spíná a vysílá signalizační a vypínací impulsy přes svoje kontakty p .

Ochrany bloku alternátor - blokový transformátor - transformátor vlastní spotřeby

Alternátory velkých jednotkových výkonů pracují obvykle v bloku s transformátorem vn/vvn. K bloku patří také transformátor vlastní spotřeby a budič. Ochrany bloku jsou proto projektovány jako jediný soubor, který se v poslední době umísťuje do společné skříně. Působení ochran lze volit na matici pomocí kolíků. Soubor je vybaven zařízením, které umožňuje zkoušet ochrany za provozu. Při zkoušení je odpojen výstup ochrany, aby nedošlo k chybnému působení. Na vstup se přivádí fiktivní signál a výstupní signál ochrany je přiveden zpět do zkušební automatiky. Na obr. 3.41 je naznačen návrh ochran bloku alternátor - - transformátor velkého jednotkového výkonu. V tomto schématu je pro přehlednost naznačen pouze způsob připojení ochran a nejsou zde naznačeny výstupní signály a jejich působení na akční členy. Tato vazba spolu s popisem jednotlivých ochran je zvlášť uvedena v tabulce č. 7.



Obr. 3.41. Ochrany bloku : alternátor - blokový transformátor - transformátor vlastní spotřeby

Význam použitých symbolů :

- impuls ochrany bez čas. zpoždění
- impuls ochrany s čas. zpožděním

| Chráněný objekt | Číslo ochrany | Typové označení | Ochrana | Vypínač N 1 | Vypínač N II A | Vypínač N II B | Rychlouzávěr RZ | Odbuzovač PG | Snížení výkonu turbíny (30%) | Výstraha Signál | |
|--|---------------|--|--|-------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|--------------------------------|-----------------|---|
| | | | | | | | | | | | |
| A L T E R N Á T O R | R 1. | R 30 X 1 | Rozdílová ochrana alternátoru G 1 | ● | ● | ● | ● | ● | | | |
| | D 1. | D 15 X 1 | Distanční ochrana alternátoru G1 | I.stupeň | ● | ● | ● | ● | ● | | |
| | | | | II.stupeň | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| | | | | III.stupeň | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| | A 1. | A 3 T X 1 | Nedproudá ochrana časově nezávislá 3 fázová, působí při zkratu | ● | ● | ● | ● | ● | | | |
| | D 2. D 3. | D 20 X 1 | Ochrana při ztrátě buzení alt. G1 | I.stupeň | | | | | | ● | ● |
| | | | | II.stupeň | ○ | ○ | ○ | | ○ | | |
| | D 4. | D 20 X 1 | Ochrana při asynchronním chodu alt. G1 | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | |
| | A 2. | A 3 P X 1 | Nedproudá ochrana časově závislá 3f. při přetížení | I.stupeň | | | | | | | ● |
| | | | | II.stupeň | ○ | ○ | ○ | | | | |
| | QW 1 | Q 1 W X 1 | Zpětná wattová ochrana | I.stupeň | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| | | | | II.stupeň | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| | GF 1 | GF 1 X 1 | Zemní ochrana statoru (0 až 90%, 50 Hz) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ● | |
| | GF 2 | GF 3 X 1 | Zemní ochrana statoru (50 - 100%, 50 Hz) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ● | |
| | G 1. | G R X 1 | Zemní ochrana rotoru alternátoru, měření izolačního stavu | | | | | | | | ● |
| | V 1. | V 2 T X 1 | Napěťová ochrana alt. | I.stupeň | ● | ● | ● | | ● | | |
| | | | | II.stupeň | ○ | ○ | ○ | | ○ | | |
| | V 2. | V 2 T X 1 | Napěťová ochrana alt. | I.stupeň | ● | ● | ● | | ● | | |
| | | | | II.stupeň | ○ | ○ | ○ | | ○ | | |
| | A 7 | A 21 X 1 | Ochrana proti ložiskovým proudům, měření | I.stupeň | | | | | | | ● |
| II.stupeň | | | | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | |
| R 5 | R 30 X 1 | Rozdílová ochrana bloku G1 a T1 | ● | ● | ● | ● | ● | | | | |
| F 1 | F 11 X 1 | Podkmitočtová ochrana (blok. RZ) | | | | | | | | ● | |
| V 3 | V 3 L X 1 | Kontrola napětí transf. U ₁ , U ₂ , U ₃ | U ₁ | | | | | | | ● | |
| | | | U ₂ | | | | | | | ● | |
| | | | U ₃ | | | | | | | ● | |
| N 1 | N 10 X 1 | Ochrana při nesouměrném zatížení alternátoru | I.stupeň | | | | | | | ● | |
| | | | II.stupeň | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|--|------------|---|---|---|---|---|---|--|
| Blokový transformátor T1 | R 2 R 30 X 1 | Rozdílová ochrana transformátoru T1 | ● | ● | ● | ● | ● | | | |
| | A 8 A 3 T X 1 | Ochrana nádoby transformátoru T 1 | I. | | | | | | ● | |
| | | | II. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| | B 1 B F T 1. 1 | Plynové relé T1 | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | |
| TP 1 TFT 1.1 | Nebezpečná teplota oleje transformátoru T1 | | | | | | | | ● | |
| Transformátor vlastní spotřeby | R 3 R 30 X 1 | Rozdílová ochrana transformátoru T1 | ● | ● | ● | ● | ● | | | |
| | A 3 A 3 T X 1 | Nadproudá, časově nezávislá ochrana 3 fázová, při přetížení | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ● | |
| | D 5 D 15 X 1 | Distanční ochrana transformátoru vlastní spotřeby T 11 | I.stupeň | ● | ● | ● | ● | ● | | |
| | | | II.stupeň | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| | | | III.stupeň | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| | A 4 A 3 T X 1 | Nadproudá, časově nezávislá ochrana 3 fázová, při přetížení, sekce A | | ○ | | | | | | |
| | A 5 A 3 T X 1 | Nadproudá, časově nezávislá ochrana 3 fázová, při přetížení, sekce B | | | ○ | | | | | |
| B 2 B F T 1.1 | Plynové relé T 11 | | | | | | | | ● | |

Tab. 7. Působení ochrany bloku

3.2.1. Regulace napětí alternátorů

Alternátory v elektrárnách zajišťují výrobu činného a jalového výkonu. Podíl obou složek je dán volbou jmenovitého účinníku alternátorů a způsobem jejich provozu. Řízení velikosti činného výkonu alternátoru souvisí s regulací rychlosti stroje a promítá se do reálné osy fázorových diagramů, popisujících chod alternátoru a elektrizační soustavy. Řešení napětí a jalových výkonů je obdobným úkolem, který je ale prováděn pomocí změn budícího proudu a zobrazuje se do imaginární osy provozních fázorových diagramů. Hlavním úkolem elektrárenského bloku je výroba činného elektrického výkonu a je proto třeba zabezpečit, aby vinutí statoru a rotoru nebyla přetěžována jalovým zatížením. Podle požadavků ES při dodržení provozních diagramů zajišťujeme, aby alternátor předával do sítě především činnou složku výkonu a teprve podle toho můžeme ještě zatěžovat alternátor jalovou složkou proudu. Tato úvaha je důležitá především pro turboalternátory, u hydroalternátorů můžeme díky bohatě dimenzovanému budicímu obvodu počítat s větším podílem jalové energie, dodané do sítě. Při řešení otázek regulace buzení alternátorů se budeme zabývat případem, kdy alternátor pracuje do velké elektrizační soustavy, jejíž kmitočet ani napětí se nemění vli-

Coordinace výkonu a výkonu

vem provozu vyšetřovaného stroje. Zvýšení hnacího momentu na hřídeli se projeví jako zvýšení toku činné složky výkonu do elektrizační soustavy, změna budícího proudu vyvolá změnu toku jalového proudu a výkonu do elektrizační soustavy.

Regulace napětí alternátorů se provádí prostřednictvím regulátorů napětí, které řídí výkon budících soustav. Regulátory napětí musí také zajišťovat rozdělování jalového zatížení na jednotlivé alternátory, které pracují vedle sebe. Dále je třeba, aby regulátory napětí zajišťovaly správný provoz alternátorů při přechodných stavech v ES, zejména při zkratech nebo náhlém odlehčení sítě. Při odpojení zatíženého alternátoru od sítě dojde ke vzrůstu napětí na svorkách, které se dále může zvyšovat s nárůstem otáček odlehčeného alternátoru až na hodnotu $150\% U_n$, kdy musí způsobit přepěťová ochrana. Regulace napětí musí snížit tuto hodnotu na jmenovitou a to rychlým odbuzením alternátoru a zachovat napájení vlastní spotřeby bloku.

Otázky stability chodu ES úzce souvisí s kvalitou regulace napětí a jalového výkonu alternátorů zapojených do ES. Se vzrůstajícím buzením se zmenšuje zátěžný úhel alternátoru - při konstantním činném výkonu - a zvyšuje se statická i dynamická stabilita synchronního stroje.

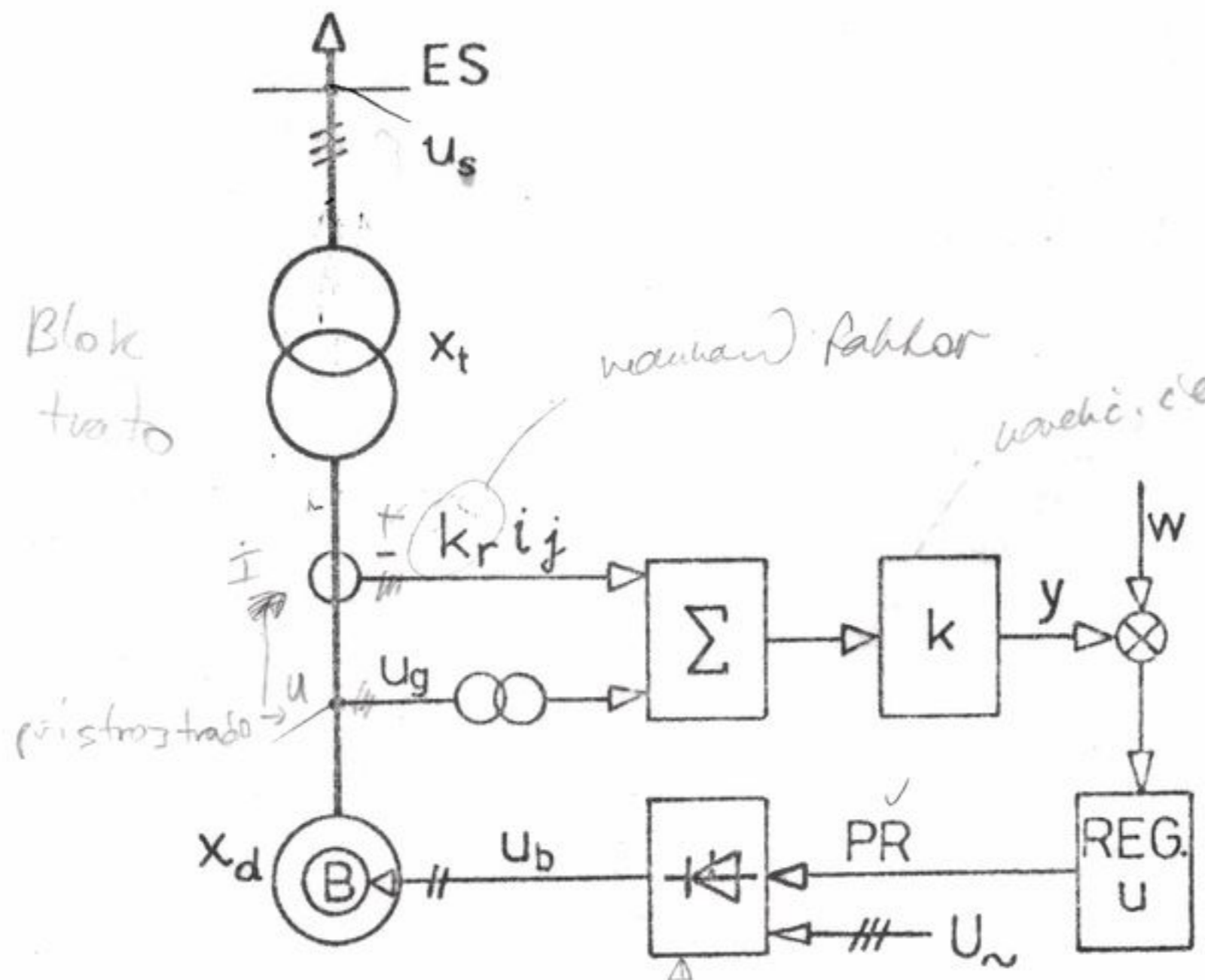
Pro určité případy přechodných nebo poruchových stavů v ES se vyžaduje nárazové přibuzení alternátorů s ohledem na zvýšení stability ES. Veličiny, které přivedíme do vstupu regulátoru z toho hlediska jsou například tyto :

- změna napětí - ΔU
- změna činného nebo jalového zatížení $\Delta P, \Delta Q$
- změna zátěžného úhlu, případně jeho derivace $\Delta \psi; \frac{d\psi}{dt}$
- jalová složka zátěžného proudu i_j

Regulátory buzení

Regulace buzení podle odchylky napětí s proudovou stabilizací

1. Při stanovení základních podmínek činnosti regulátoru buzení uvažujeme případ, kdy alternátor pracuje do velké elektrizační soustavy, jejíž napětí nemůže alternátor ovlivnit. Schema regulátoru napětí (buzení) je na obr. 3.41.



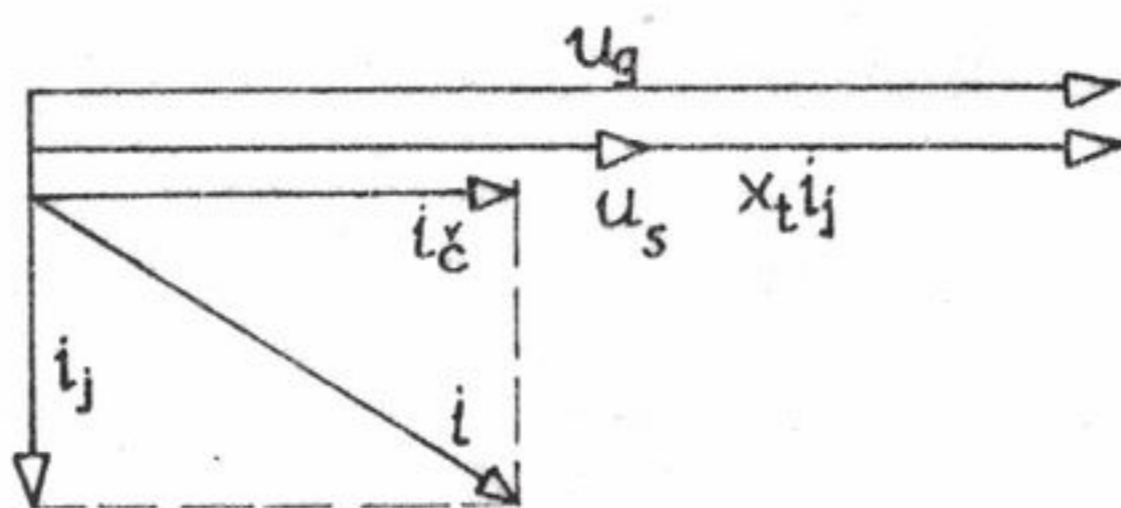
Obr.3.41!
Schema re-
gulace na-
pětí
 $y = (U_g + k_r i_j) \cdot k$

vlastní spotřeba
stavbu proudu

kde značí :

- u_s ... napětí za blokovým transformátorem
- u_g ... napětí na svorkách alternátoru
- i_j ... jalová složka proudu alternátoru
- k_r ... redukční faktor hodnoty i_j
- k ... korekční člen změny zesílení
(hladinový odpor)
- w ... konstantní řídicí veličina
- R ... regulátor napětí
- $P\check{R}$... řídicí veličina
- Σ ... součtový člen
- y ... regulovaná veličina
- X_d ... synchronní reaktance alternátoru

Všechny veličiny proudu a napětí uvažujeme v poměrných hodnotách. Při dodávce elektrického výkonu obecného charakteru z alternátoru do elektrizační soustavy uvažujeme jen jalovou složku zatížení, které vytváří složku úbytku napětí na blokovém transformátoru, orientovanou ve stejném smyslu jako napětí U_s . Fázorový diagram je na obr. 3.42.



kde značí :

- i ... proud alternátoru
- i_c ... činná složka proudu
- i_j ... jalová složka proudu
- X_t ... reaktance blokového transformátoru

Obr. 3.42. Fázorový diagram pro zatížení alternátoru

Podle fázorového diagramu na obr. 3.42. pak platí :

$$u_s + X_t i_j = u_g \quad (3.51)$$

Do regulátoru napětí přivedíme okamžité hodnoty napětí u_g a jalové složky proudu i_j . Redukční faktor k_r má vliv na napětí alternátoru v závislosti na velikosti jalového zatížení. Zanedbáme-li ustálenou regulační odchylku regulátoru napětí, pak platí pro porovnání řídicí veličiny s regulovanou veličinou :

$$w - (u_g + k_r i_j) k = 0 \quad (3.52)$$

kde :

$$k (u_g + k_r i_j) = y$$

Dosažením vztahu (3.51) do (3.52) dostaneme :

$$W = (u_s + x_t i_j + k_r i_j) k$$

po upravení :

$$u_s = \frac{W}{k} - i_j \overbrace{(x_t + k_r)}^{k_s} \quad (3.53)$$

Dostáváme regulační rovnici pro ustálený stav. Je zřejmé, že na regulaci napětí má stejný vliv změna řídicí veličiny W jako změna zesílení k .

$$\text{Výraz : } i_j (x_t + k_r) = i_j \cdot k_s \quad (3.54)$$

představuje proudovou stabilizaci regulátoru napětí, kde :

k_s ... výsledná hodnota stabilizace

Reaktance blokového transformátoru bývá obvykle :

$$x_t = 0,10 \div 0,12$$

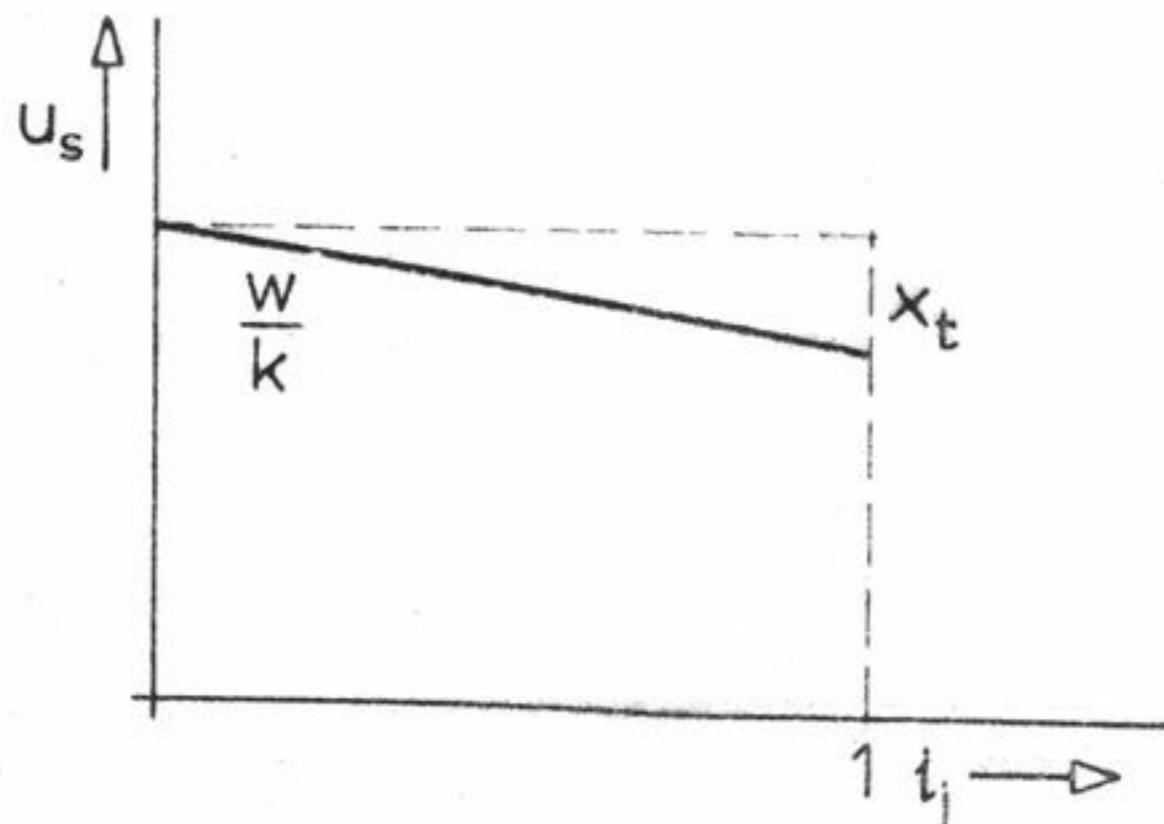
Charakteristika regulátoru bude dána podle rovnice (3.53) hodnotou reaktance blokového transformátoru a velikostí jalového proudu řízenou redukčním faktorem k_r .

V prvním případě budeme uvažovat, že regulátor není stabilizován jalovým proudem i_j , to znamená, že $k_r = 0$. Rovnice (3.53) bude mít v tomto případě tvar :

$$u_s = \frac{W}{k} - i_j x_t \quad (3.55)$$

Charakteristika regulátoru je statická, regulátor se snaží udržovat zadanou hodnotu, určenou poměrem $\frac{W}{k}$.

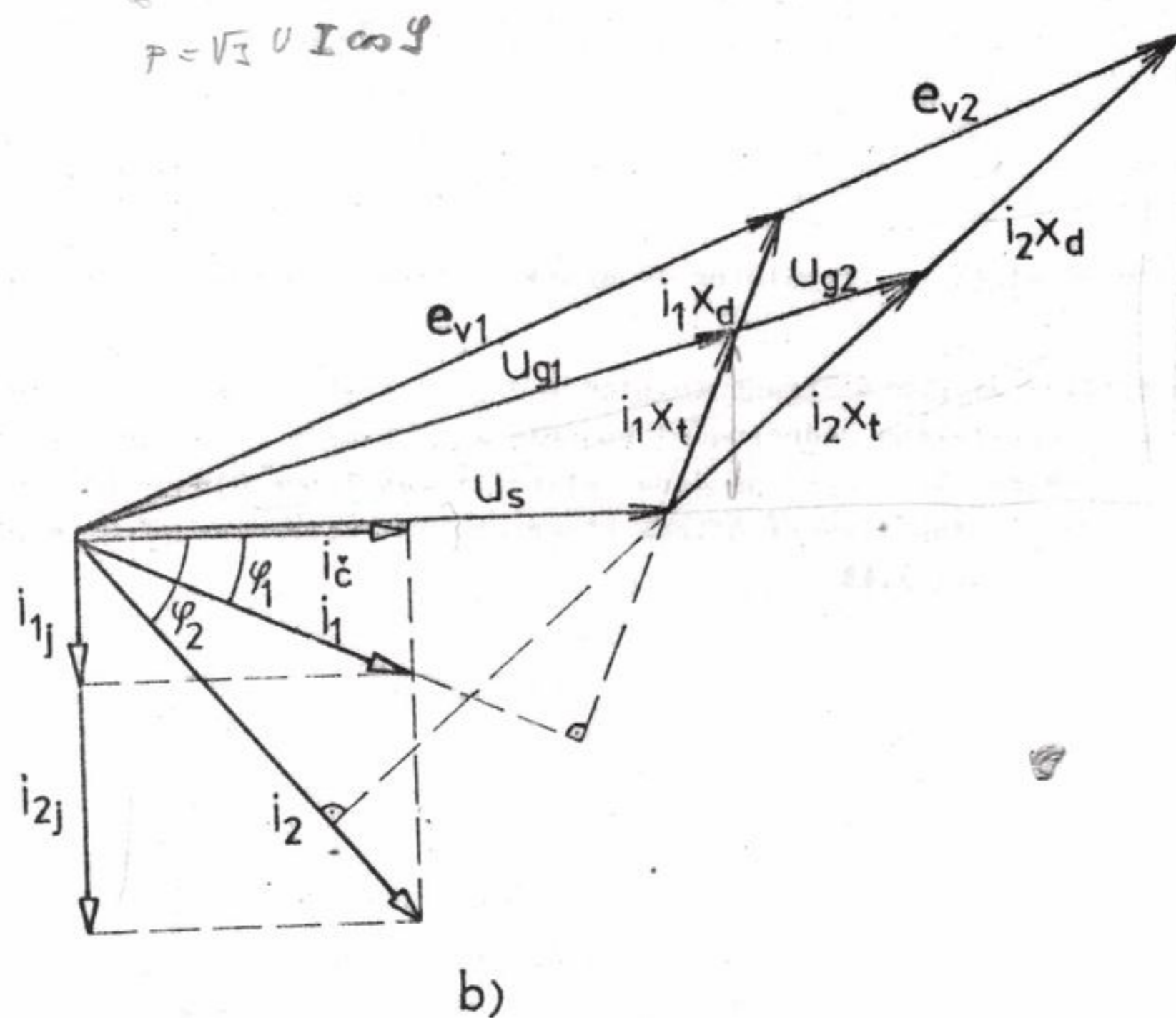
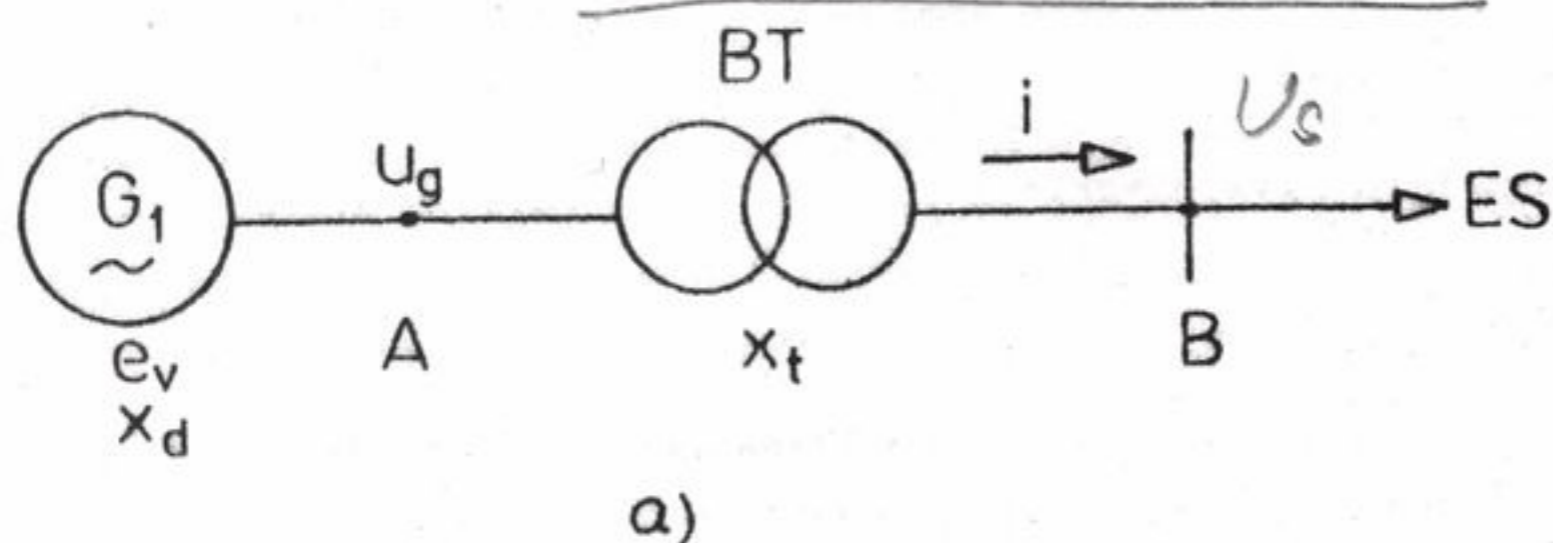
Ustálený stav nastane, jestliže se pravá strana rovnice (3.53) rovná levé straně, to znamená, že každé hodnotě u_s je přiřazena jednoznačně hodnota i_j . Provoz regulátoru je tedy stabilizován, výsledná statika regulátoru k_s je dána velikostí reaktance blokového transformátoru x_t . Tento jev nazýváme " stabilizační účinek blokového transformátoru " a je patrný z charakteristiky regulátoru na obr. 3.43



Obr. 3.43. Charakteristika regulátoru pro $k_r = 0$

Stabilizační účinek blokového transformátoru si můžeme ještě názorněji ukázat na fázorovém diagramu na obr. 3.44 b), který odpovídá situaci na obr. 3.44 a). Předpokládáme, že alternátor je zatížen proudem obecného charakteru, přičemž činná složka proudu i_c bude konstantní. Jalové složka proudu, která je rozhodující pro činnost regulace buzení alternátoru, bude proměnná a pro vysvětlení případu budeme sledovat její dvě hodnoty i_{1j} a i_{2j} . Při jalové zátěži i_{1j} se vytváří úbytky napětí na blokovém transformátoru $i_1 X_t$ a na alternátoru $i_1 X_d$, které určují vnitřní napětí alternátoru e_{v1} a napětí na jeho svorkách u_{g1} . Při zvětšení jalového zatížení na hodnotu i_{2j} se zvětší také odpovídající úbytky napětí $i_2 X_t$ a $i_2 X_d$, kterým odpovídá nový stav alternátoru, daný vnitřním napětím e_{v2} a svorkovým napětím u_{g2} . Zvýšené jalové zatížení alternátoru se tedy projeví tím, že regulátor napětí dostává vstupní hodnotu napětí vyšší, neboť :

$u_{g2} > u_{g1}$, takže regulátor buzení snižuje budící proud a převádí tak jalové zatížení na ostatní alternátory.



Obr. 3.44. Stabilizační účinek blokového transformátoru

Stabilizační účinek blokového transformátoru je z hlediska provozu alternátoru a regulace buzení příliš velký. Požadovaná hodnota k_g se pohybuje mezi 0,03 až 0,07, proto musíme stabilizační účinek blokového transformátoru potlačit a to způsobem, který bude vysvětlen v násled-

dujícím bodě :

Alternátor pracuje do elektrizační soustavy přes blokový transformátor, do regulátoru napětí přivádíme údaj o velikosti jalového zatížení tak, že :

$$k_r > 0$$

Regulační rovnice (3.53) pak bude mít tvar :

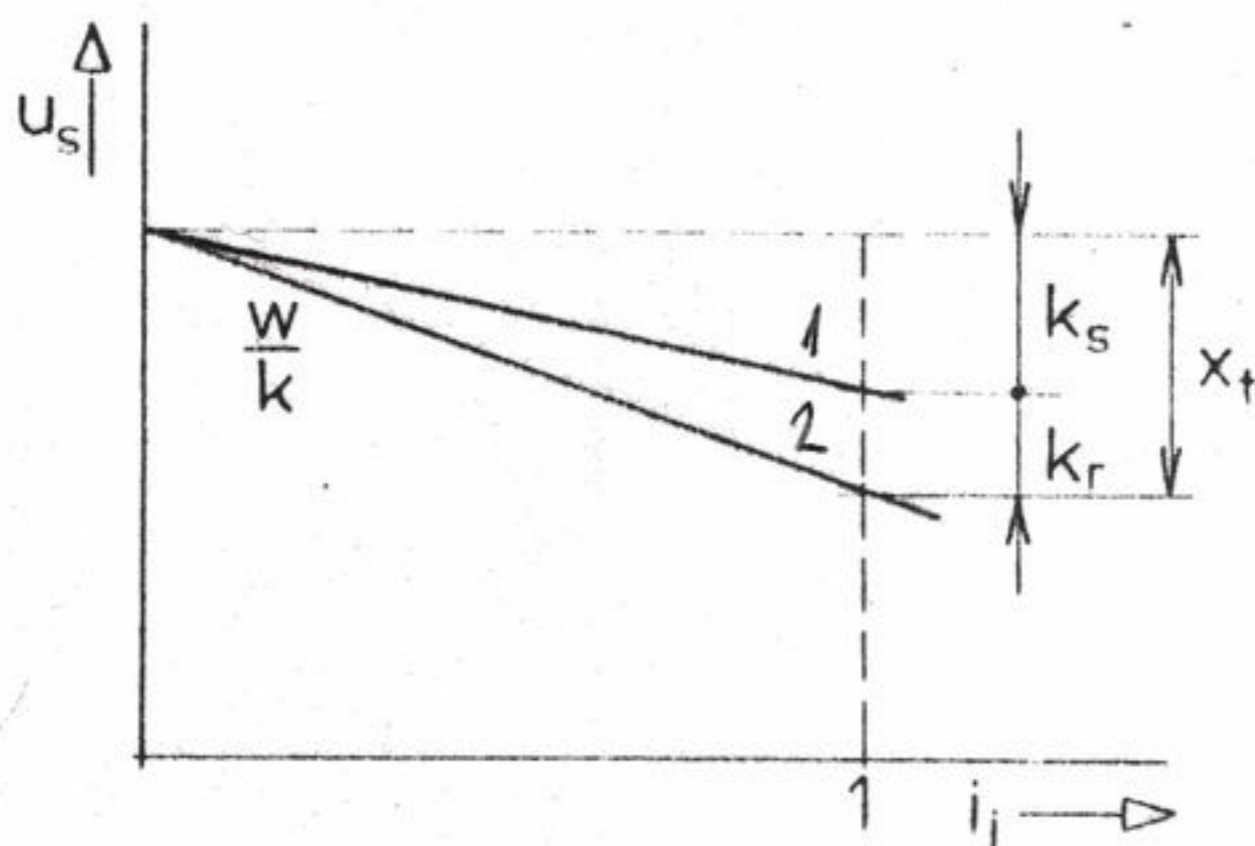
$$u_s = \frac{W}{k} - i_j (X_t - k_r) \quad (3.56)$$

Výsledná statika regulátoru :

$$k_s = X_t - k_r \quad (\text{pro } k_r > 0)$$

pak představuje snížení stabilizačního účinku blokového transformátoru na požadovanou hodnotu. Tento jev nazýváme " kompaundací regulátoru jalovu složkou proudu " .

Výsledná charakteristika regulátoru je pro tento případ nakreslena na obr. 3.45.



Obr. 3.45. Charakteristika regulátoru pro $k_r > 0$

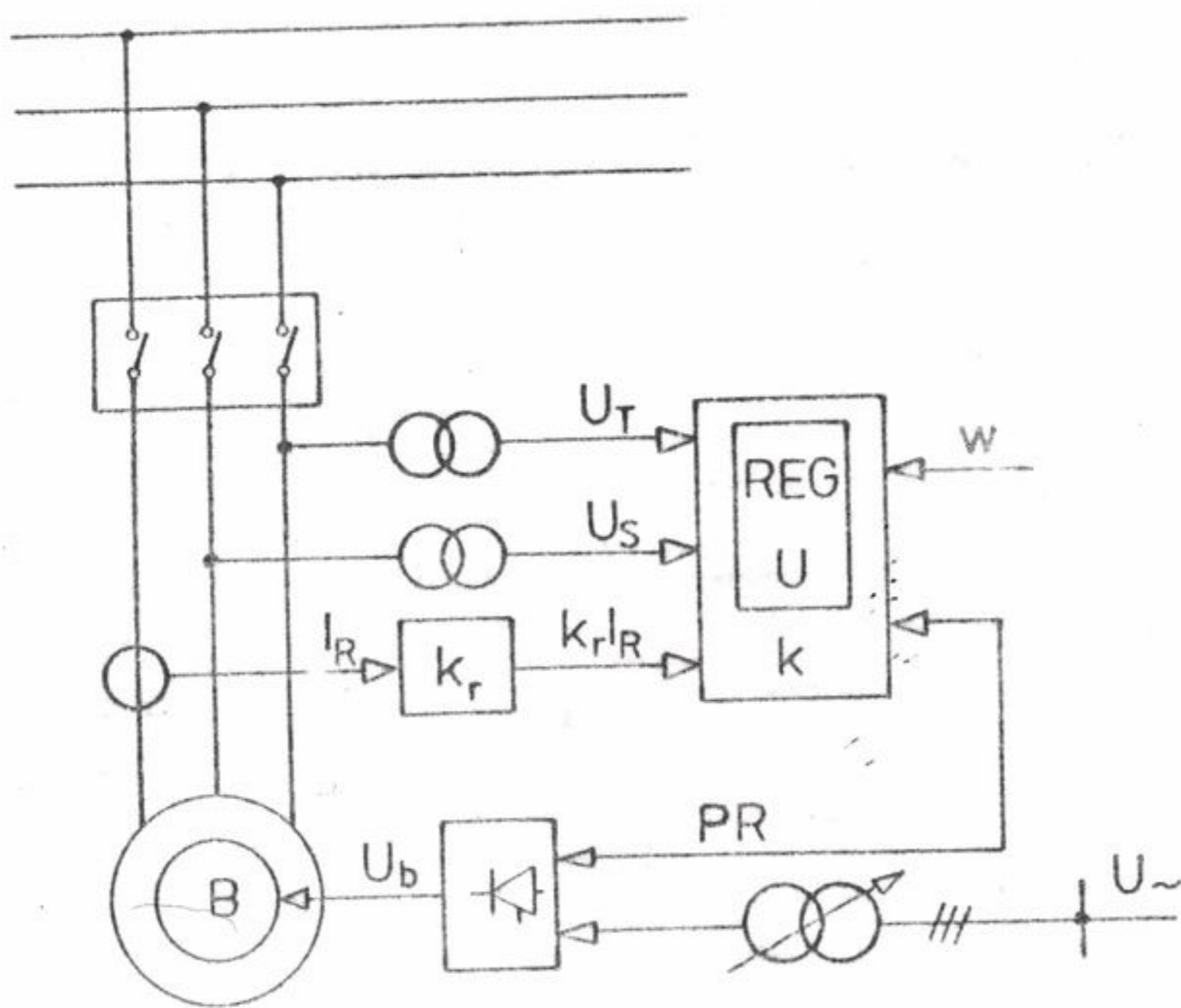
kde značí :

- 1 - charakteristiku regulátoru pro $k_r = 0$
- 2 - výslednou charakteristiku pro $k_r > 0$

Charakteristika je opět statická, což nám umožňuje stanovit velikost jalového zatížení podle hodnoty napětí u_s .

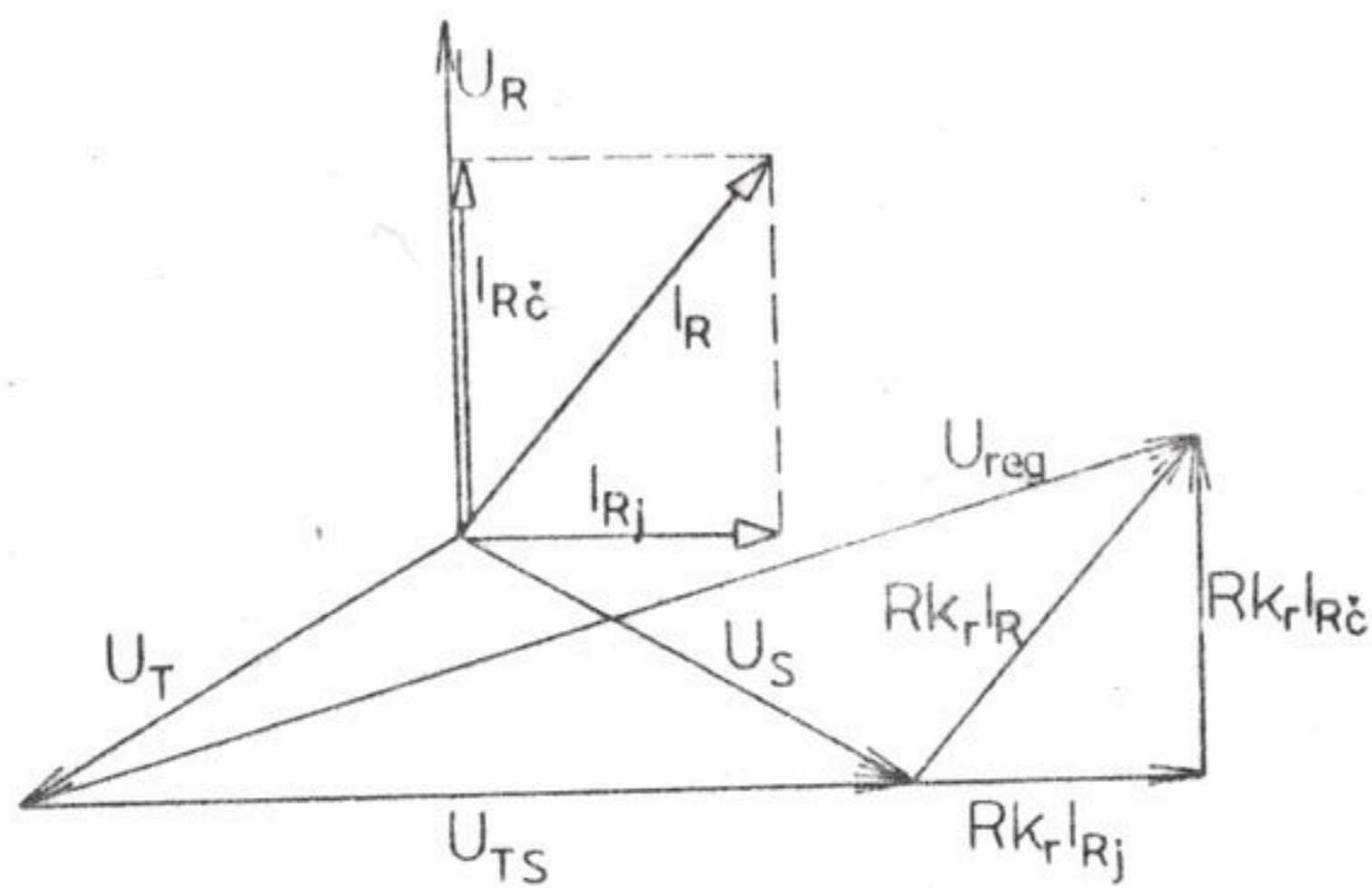
2. Alternátor pracuje přímo do přípojnic

V tomto případě je obvykle alternátor oddělen od spotřebitelské sítě spojovacím transformátorem, takže se stabilizační účinek transformátoru příliš neuplatní. Proto nařizujeme redukční faktor k_r na zápornou hodnotu ($k_r < 0$) a provedeme tím stabilizaci regulátoru . Na obr. 3.46 je nakresleno základní zapojení regulátoru buzení alternátoru, který pracuje přímo na přípojnicích se závislou budicí soustavou a přímým řízením budicího proudu.



Obr. 3.46. Regulace buzení alternátoru

Ve fázorovém diagramu na obr.3.47 je naznačen princip proudové kompenzace jalovou složkou proudu. Napětí U_{reg} , které odpovídá regulované veličině je přímo závislé na proudu I_{Rj} , který vytváří úbytek napětí $R \cdot k_r I_{Rj}$.

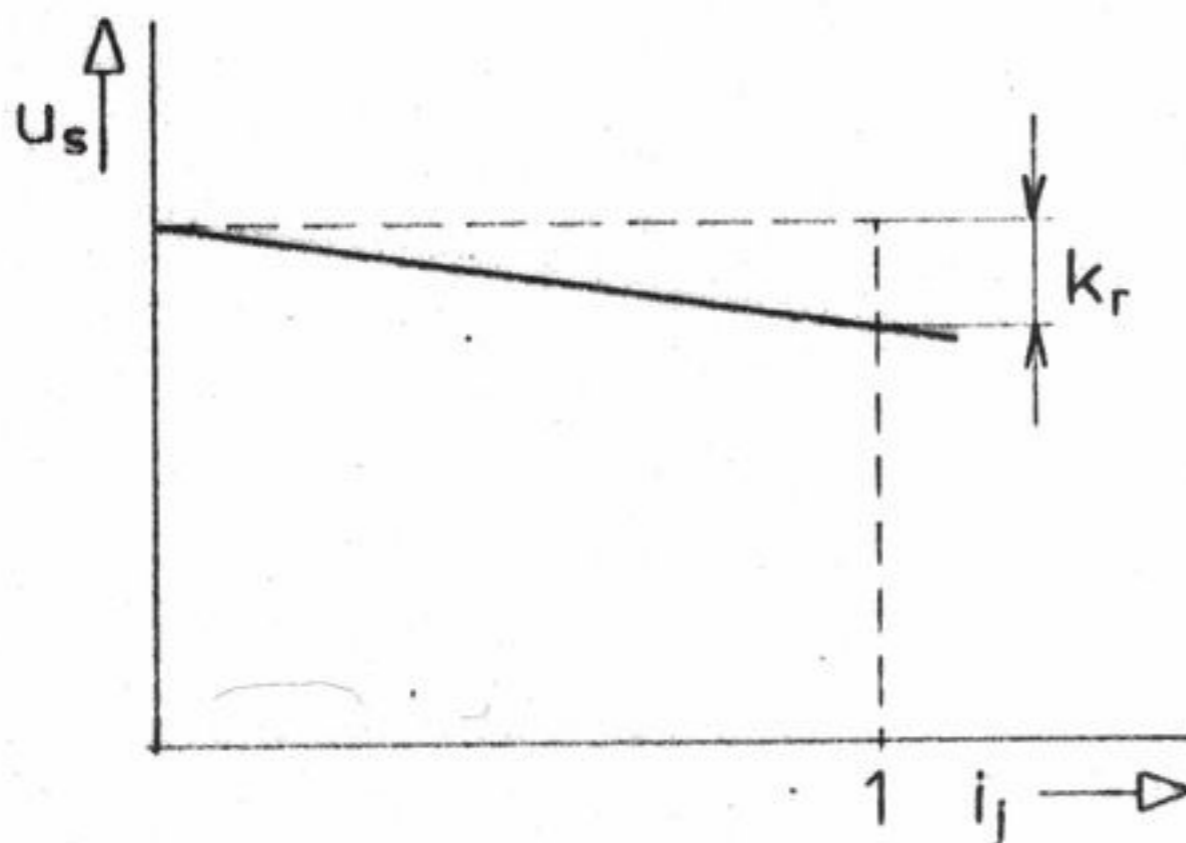


Obr. 3.47. Fázorový diagram vstupních hodnot regulace buzení

Výsledná charakteristika regulátoru je statická, regulační rovnice pro $X_t = 0$ a $k_r < 0$ bude mít tvar :

$$u_s = \frac{w}{k} - i_j k_r \quad (3.57)$$

Na obr. 3.48 je nakreslena charakteristika regulátoru odpovídající rovnici (3.57), která umožňuje nastavení požadované jalové zátěže pro alternátor a při paralelní spolupráci několika alternátorů na přípojnice také umožňuje zajistit rozdělování jalových výkonů na jednotlivé stroje.



Obr. 3.48. Charakteristika regulátoru

Příklad regulace buzení turboalternátoru - 200 MW

Zásadní schéma budicí soustavy s regulátorem buzení je na obr. 2.13. Hlavní alternátor G 1 je buzen neřízeným usměrňovačem U_3 . Regulace napětí se provádí změnou budicího proudu alternátoru G 2 budicí soupravou, kterou tvoří :

- RNG - regulátor napětí alternátoru
- SO - spouštěcí obvody
- ŘU1 - řízený usměrňovač

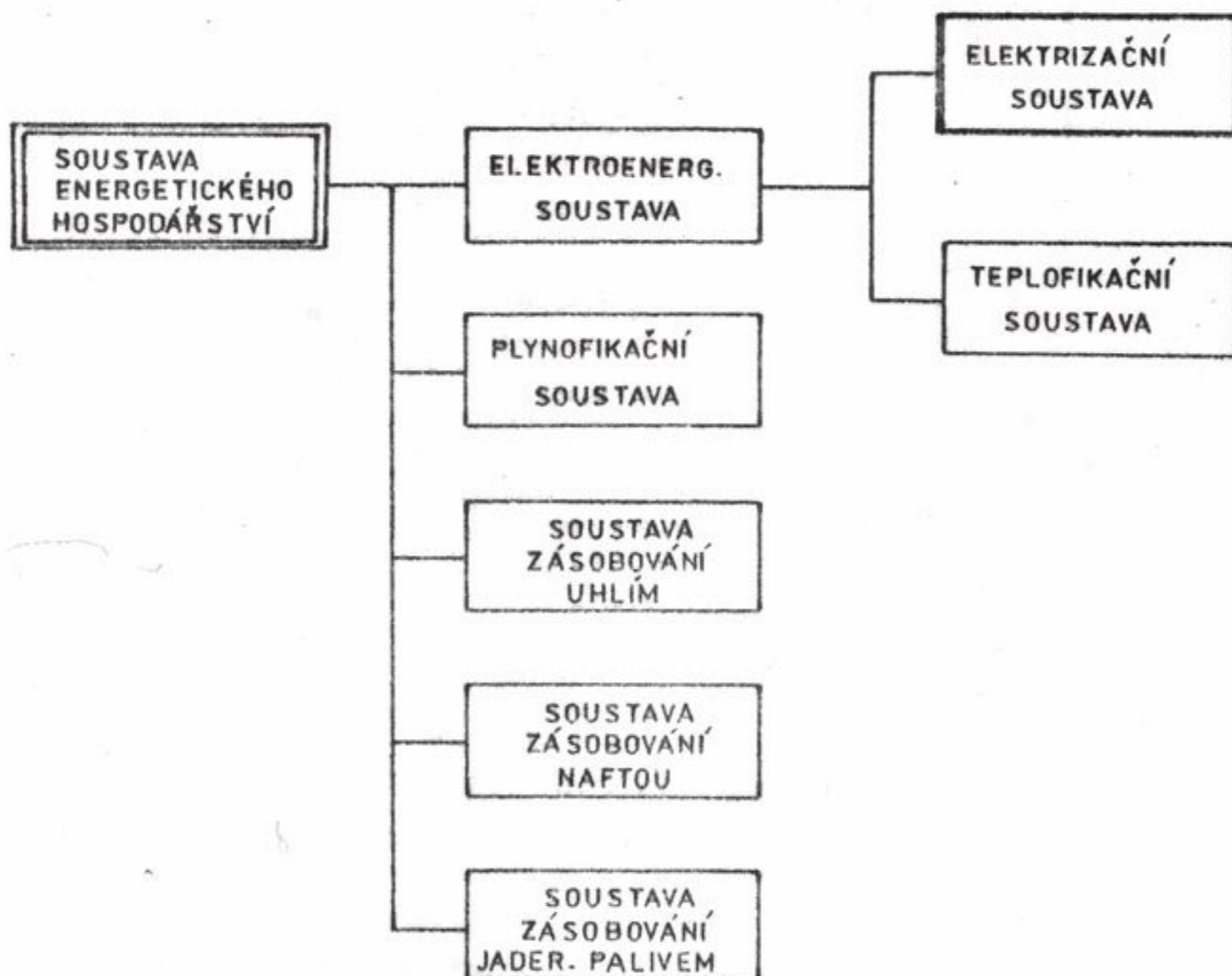
Napájení usměrňovače U_1 zajišťuje pomocný alternátor G3, jehož napětí je udržováno konstantní proudovou fázovou kompaundací K. Usměrňovač U_2 a indukční regulátor IR tvoří rezervní buzení, které je napájeno z rozvodny vlastní spotřeby a které automaticky reguluje výstupní napětí U_2 podle změn napětí U_1 . Při poruše budicí soustavy provede regulátor automatický zaskok na rezervní buzení.

Blokové schéma regulátoru napětí je na obr. 3.49.

Zadaná hodnota napětí se odebírá z motoricky ovládaného potenciometru PZH a vede se na sčítací člen, kde se vytváří regulační odchylka porovnáním se skutečným napětím alternátoru, získaným z obvodů charakterizujícím koeficientem statickým. Na tento sčítací člen se zavádí signál derivační zpětné vazby DZV od budicího napětí hlavního alternátoru G1 (hodnota napětí U_3). V případě dlouhodobého překročení satorového nebo rotorového proudu alternátoru G1 se odečítá od zadané hodnoty signál z omezovačů satorového proudu OSP nebo rotorového proudu ORP. Do sčítacího členu působí rovněž signál hlídače meze podbuzení HMP, který je realizován PI regulátorem. Signál je okamžitý při překročení hranice provozního diagramu alternátoru. Omezovače OSP, ORP zasahují s časovým zpožděním, které je nepřímo

3.2.2. Regulace kmitočtu a předávaného výkonu v elektrizační soustavě

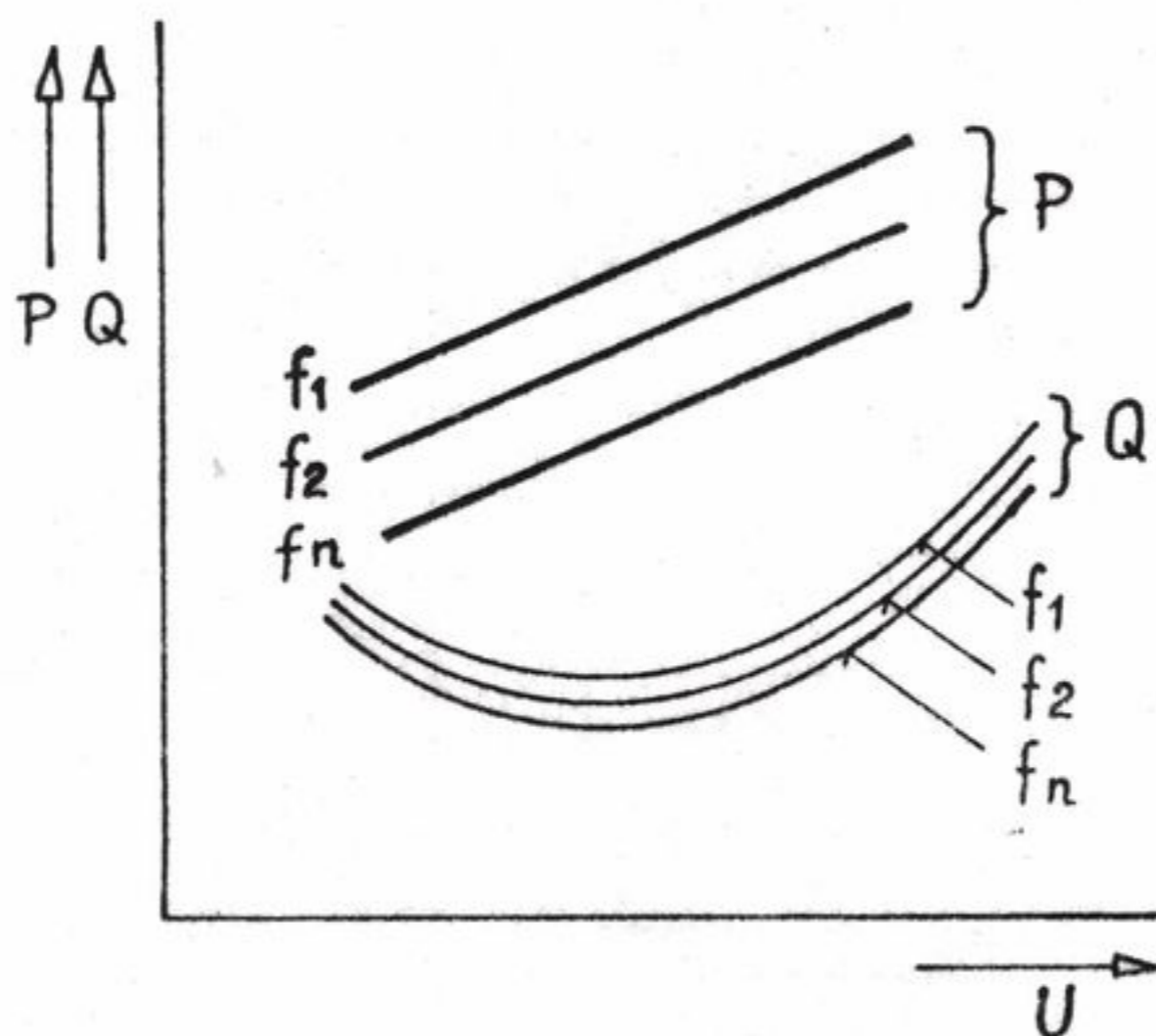
Elektrizační soustava (ES) jako nejdůležitější dílčí soustava energetického hospodářství státu (obr.3.50) je ústředně a jednotně řízený systém paralelně pracujících elektráren, elektrických přenosových a rozvodných zařízení a elektrických spotřebičů se společnou výkonovou zálohou.



Obr. 3.50. Soustava energetického hospodářství

Hlavním úkolem elektrizační soustavy je bezpečná a spolehlivá dodávka dostatečného množství elektrické energie dohodnuté kvality všem odběratelům, pokud možno s nejnižšími náklady. Nejdůležitějšími provozními parametry, určující kvalitu elektrické energie jsou kmitočet a napětí. Jejich přípustné odchylky jsou určeny technickými a hospodářskými nároky odběratelů, spolehlivostí, hospoděrností výroby a rozvodu elektřiny. Kmitočet je celosystémový parametr, při ustáleném chodu ES je ve všech místech soustavy stejný. Napětí je místní parametr, má v různých místech ES nestejnou velikost. Dalšími charakteristickými provozními parametry jsou podíl vyšších harmonických v křivce napětí a symetričnost napětí.

Pomocí universálních charakteristik $P, Q = F(f, U)$ můžeme znázornit vzájemnou závislost kmitočtu, napětí, činných a jalových výkonů v ES dle obr.3.52.



Obr. 3.52. Závislost $P, Q = F(f, U)$

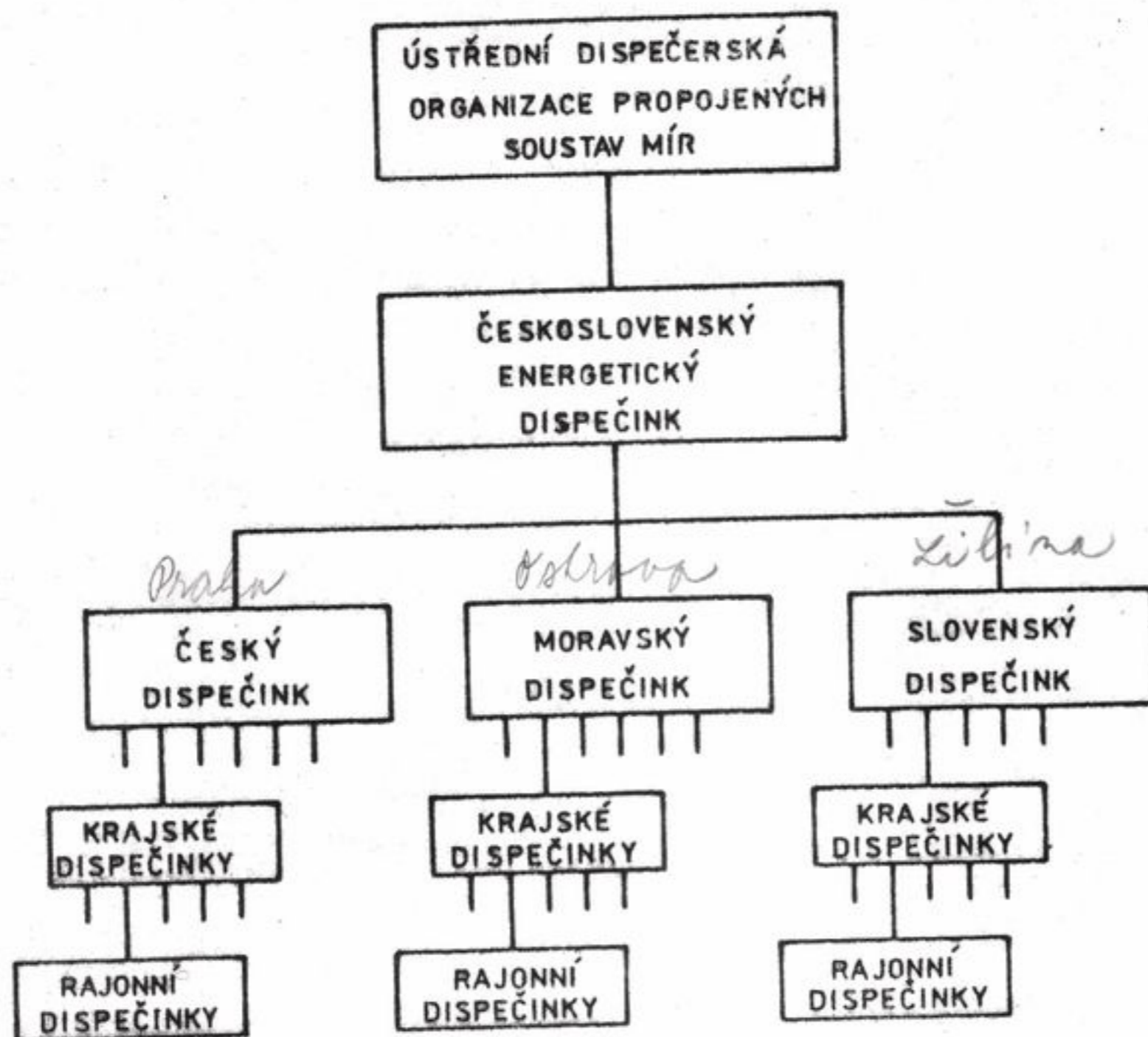
Z obr. 3.52. vyplývá, že při změně f (určitém U) se značně změní P , při změně U se P příliš nemění. U jalových výkonů při změnách f se Q příliš nemění, ale Q se výrazně mění se změnou U . Z toho vyplývá, že $P \sim f$ a $Q \sim U$ takže je možno obě kvalitativní hlediska analyzovat zvlášť.

Řízení ES se v zásadě člení na řízení rozvoje ES a řízení chodu ES. Uskutečňuje se v několika územních úrovních a v několika časových etapách. Územní členění závisí na rozsáhlosti a velikosti příslušné ES. Časové etapy se obvykle rozdělují na prognostiku, plánování (včetně projektování) rozvoje ES a na hospodářské řízení ES. Hospodářské řízení se dále člení na organizační a operativní řízení. Operativní hospodářské řízení ES v první etapě zajišťuje rozvoj soustavy v rozmezí několika let. V druhé etapě, kterou nazýváme dispečerské řízení, je zajišťováno řízení nepřetržitého technologického procesu ES.

Dispečerské řízení se člení na přípravu provozu ES a na vlastní operativní řízení provozu. Schema úrovní dispečerského řízení ES ČSSR je v obr. 3.51.

Československý energetický dispečink řídí mezinárodní spolupráci ES ČSSR, provoz přenosových sítí 400 kV a 220 kV, provoz přečerpacích a akumulacních vodních elektráren (operativní výkonové záloha), zajišťuje vyrovnění bilance činného výkonu. Národní dispečinky řídí provoz elektráren a napájecích rozvodných sítí 220 kV a 110 kV.

Krajské energetické dispečinky řídí přímo nebo prostřednictvím rajonních dispečinek distribuční rozvodné sítě a malé elektrárny místního významu.



Obr. 3.51. Dispečerské řízení ES ČSSR

Statická charakteristika zdrojů

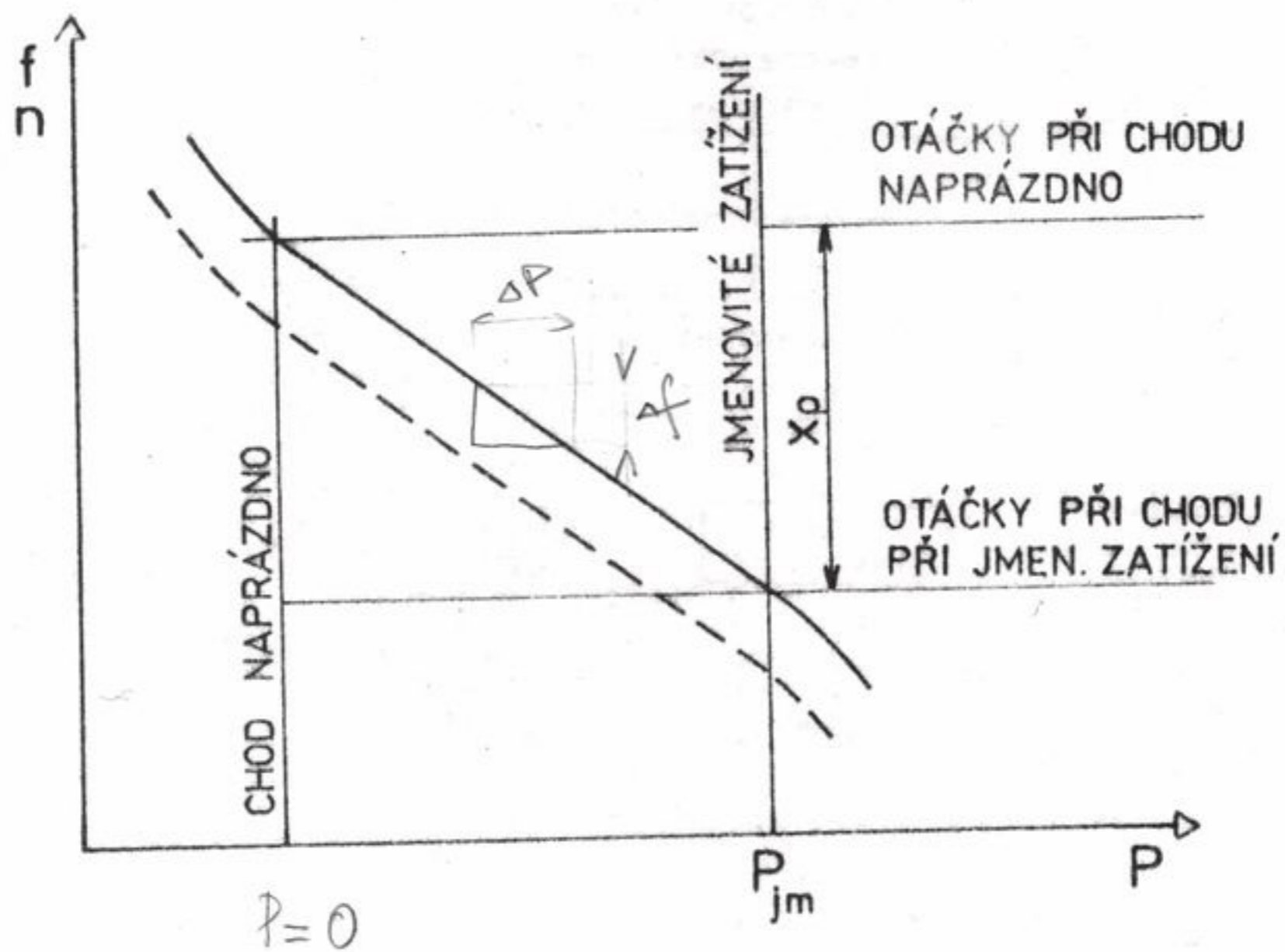
Statická charakteristika zdrojů je určena regulačními charakteristikami primárních regulátorů turbin. Pro regulaci parních turbin se většinou používají proporcionální regulátory, takže při změnách zatížení zůstává trvalá odchylka od žádané hodnoty, která musí být vyrovnána posunutím charakteristiky měničem otáček. Podle obr. 3.53. jsou nejvyšší otáčky turbosoustrojí při chodu naprázdno, snižují se při zvyšování zatížení.

Při chodu turbiny naprázdno, při fázování alternátorů nebo pracuje-li soustrojí samostatně, se měničem otáček řídí otáčky. Je-li turbosoustrojí sfázováno se sítí, měničem otáček se řídí zatěžování stroje. Při paralelní práci v ES se vlivem synchronismu nemohou při zvětšeném přítoku páry zvýšit otáčky turbíny, pokud se nezvýší kmitočet celé soustavy.

Vztah mezi pásmem proporcionality a změnou kmitočtu vyjádříme :

$$\frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{x_p}{P_{jm}}$$

(3.58)

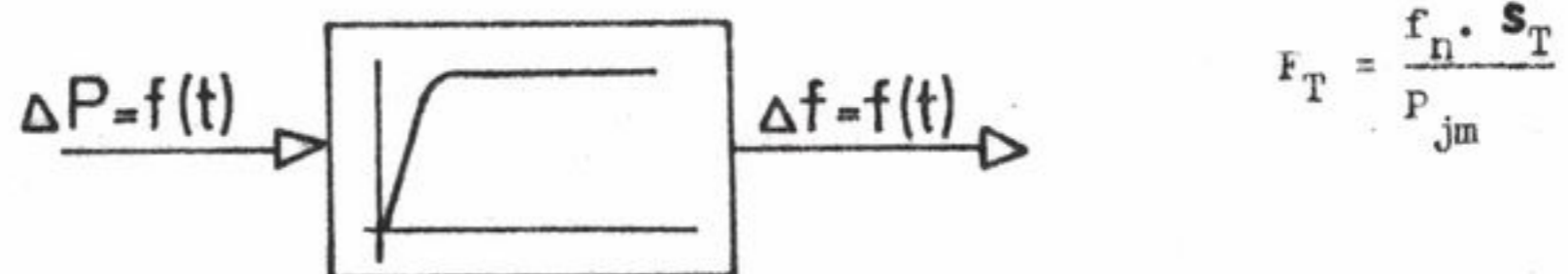


Obr. 3.53. Statická charakteristika zdroje
 x_p ... pásmo proporcionality.

Vztáhneme-li proporcionální rozsah na žádaný kmitočet f_n , určíme součinitel statismu (nerovnoměrnosti) podle vztahu :

$$s_T = \frac{x_p}{f_n} = \frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_{jm}}} \quad (3.59)$$

Blokové schéma turbosoustrojí s přenosovou funkcí je v obr. 3.54.



Obr. 3.54. Blokové schéma turbosoustrojí

Známe-li X_p nebo S_T , lze odchylku kmitočtu vypočítat pro každou změnu zatížení ΔP . V přechodových stavech změny zatížení z jedné úrovně na druhou nesleduje kmitočet statickou charakteristiku soustrojí bezprostředně, ale z důvodů funkce snímače otáček a regulačních ventilů s citlivostí 50 až 150 mHz. Ze statických charakteristik jednotlivých soustrojí je možno sestavit statickou charakteristiku výrobního systému paralelně pracujících soustrojí. V rozsáhlých ES je však tento postup prakticky neproveditelný z důvodů velkého počtu soustrojí, nelinearit jejich charakteristik a necitlivostí jednotlivých regulátorů, k měnícímu se poměru zatížení jednotlivých strojů. Proto se statická charakteristika výrobního systému pro danou ES zjišťuje experimentálně.

Statická charakteristika zatížení

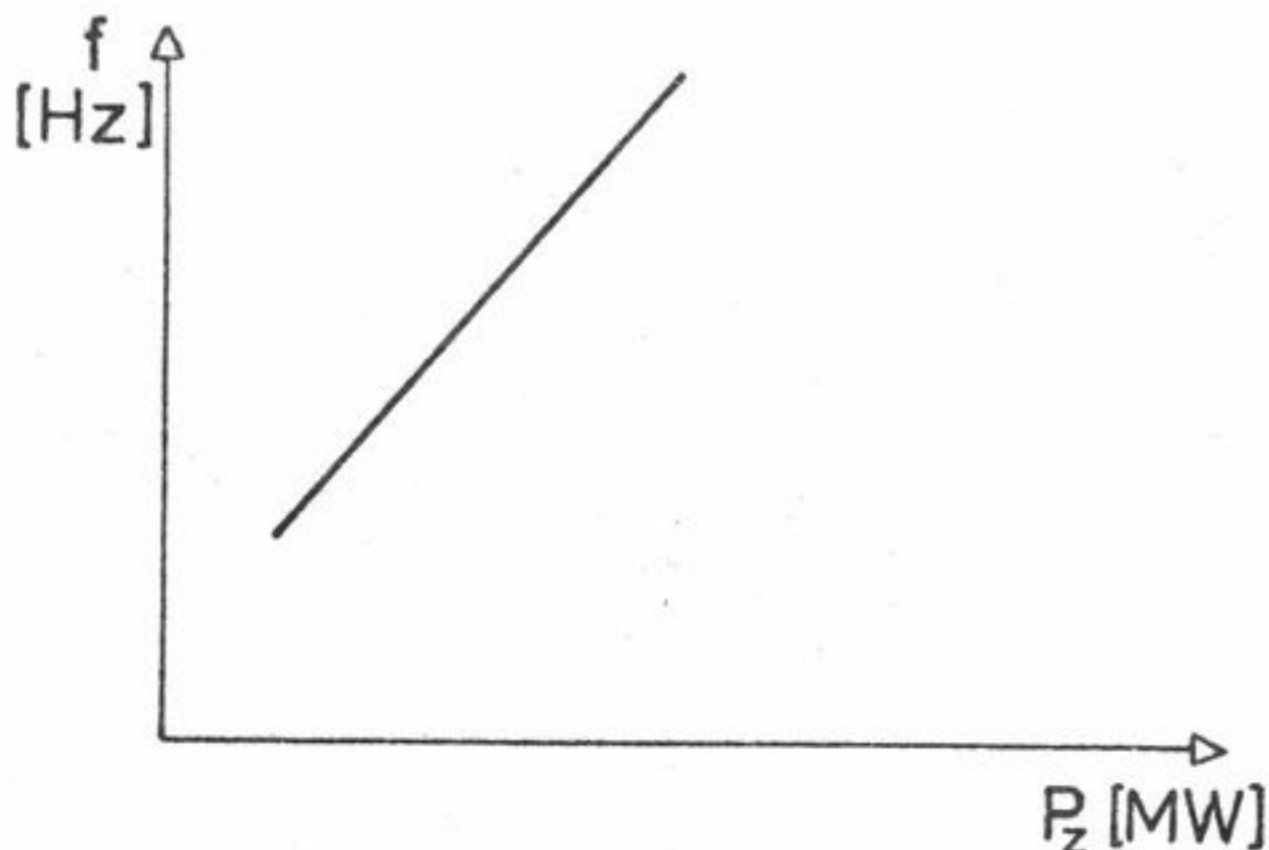
Závislost změny zatížení ES na kmitočtu je možné teoreticky zjistit ze známých statických charakteristik jednotlivých spotřebičů. Předpokládáme-li konstantní napětí a výkon alternátorů, potom můžeme zatížení určit ze vztahu :

$$P_z = P_0 + k_1 f + k_2 f^2 + k_3 f^3 + k_4 f^4 \quad (3.60)$$

kde :

- P_0 ... ohmické nebo kmitočtově nezávislé zatížení (osvětlení žárovkami, topení, pece apod.)
- k_1 ... součinitel pro stroje s lineární závislostí činného výkonu na kmitočtu (pístová čerpadla a kompresory, dopravní a obráběcí stroje, kulové mlýny apod.)
- k_2 ... součinitel pro ztráty v sítích, které rostou se čtvercem kmitočtu
- k_3 ... součinitel pro stroje s kubickou závislostí činného výkonu na kmitočtu (odstředivá čerpadla, turbokompresory, ventilátory apod.)
- k_4 ... součinitel pro odstředivá čerpadla pro velmi vysoké tlaky.

Znalost jednotlivých článků ES je potřebná pro různé úvahy a posouzení jejich vlivu na celkovou statickou charakteristiku ES. Zjištění statické charakteristiky zatížení celé soustavy z charakteristik jednotlivých spotřebičů však prakticky při dnešní rozsáhlosti ES není možné a určuje se experimentálně. Statická charakteristika zatížení je v obr. 3.55.



Obr. 3.55. Statická charakteristika zátěže

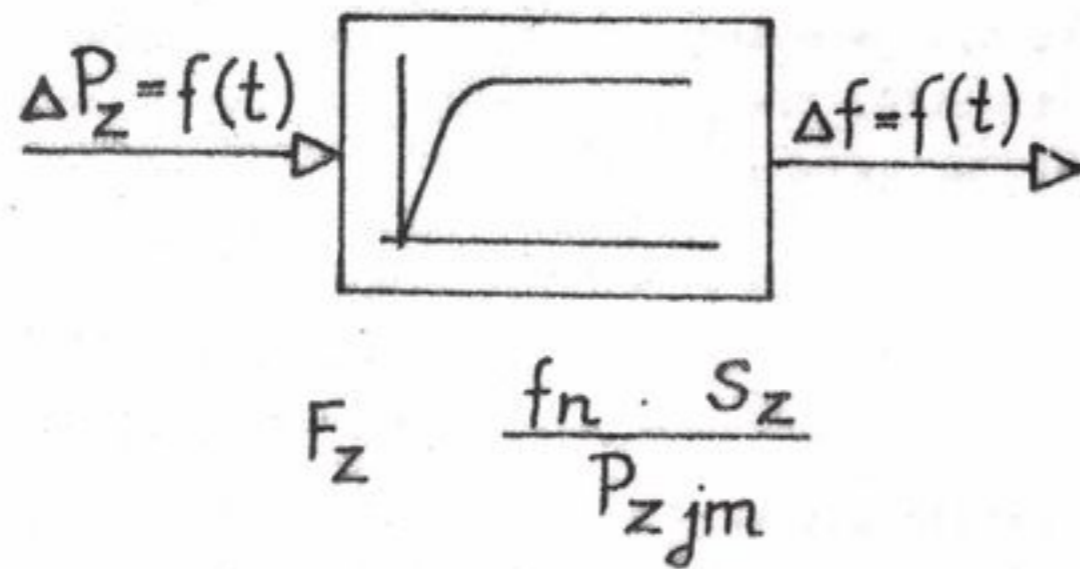
Součinitel statismu určíme ze vztahu :

$$S_z = \frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_{zjm}}} \quad (3.61)$$

kde :

P_{zjm} ... jmenovitý výkon zatížení (spotřeby)

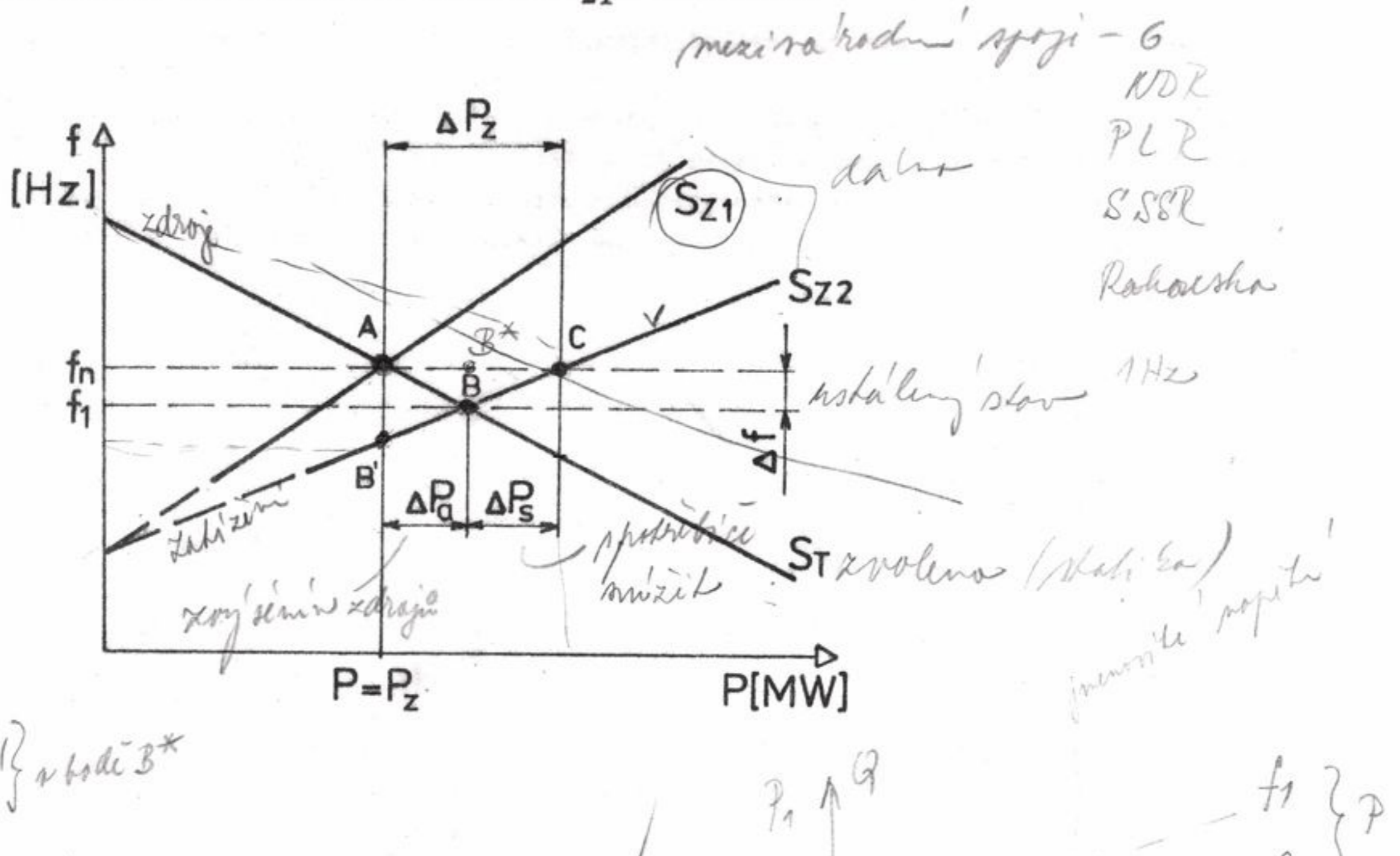
Blokové schéma pro spotřební systém s přenosovou funkcí je v obr. 3.56. :



Obr. 3.56. Blokové schéma spotřebního systému

Statická charakteristika ES

Okamžité zatížení soustavy je určeno průsečíkem statické charakteristiky zdrojů S_T a statické charakteristiky zatížení S_{z1} , obr. 3.57.



Obr. 3.57. Statická charakteristika ES

$P_1, Q = f_{ce}(f, \mu)$ pro zatížení

K narušení výkonové rovnováhy neregulované ES může dojít buď změnou zatížení nebo změnou výkonu, dodávaného zdroji. Uvažujme, že připojením dalších spotřebičů při f_n dojde ke zvýšení zatížení o ΔP_z ; statická charakteristika zátěže se posune a odpovídá nyní dle obr. 3.57 charakteristice S_{z2} . Pokud by soustrojí v soustavě nebyla staticky regulována, (neměnilo by se plnění turbin, tedy výkon by zůstal stálý), klesl by kmitočet až do bodu B'. Při statické regulaci soustrojí, při výše uvedeném narušení výkonové rovnováhy dojde k vyrovnávacímu ději, při kterém vzniklý nedostatek výkonu v ES je hrazen postupným nárůstem výkonů zdrojů a snižováním zatížení podle příslušných charakteristik. Nový ustálený stav nastane v bodě B, při nižším kmitočtu. Z obr. 3.57. vyplývá, že vlivem poklesu kmitočtu z hodnoty f_n na f_1 nedojde k růstu zatížení ES o celý přírůstek zatížení ΔP_z , ale jen o přírůstek ΔP_a , dodaný zvýšeným výkonem zdrojů ES (primární regulátory turbin zvyšují výkon turbosoustrojí). Druhá část přírůstku zatížení ΔP_s odpovídá zmenšení požadavků zatížení, způsobeném poklesem kmitočtu ($\Delta P_s = \Delta P_z - \Delta P_a$).

Na závěr lze shrnout: při narušení výkonové rovnováhy mezi zdroji a spotřebou v neregulované ES (primární statické regulace) se mění kmitočet do té doby, dokud nedojde k vyrovnání výkonové změny ΔP_z . Na tomto vyrovnání se podílejí turbosoustrojí v elektrárnách výkonem ΔP_a a zatížení výkonem ΔP_s . Velikosti výkonových příspěvků zdrojů a zatížení jsou dány jejich statickými charakteristikami.

Pro zajištění jmenovitého kmitočtu a odstranění výkonového deficitu ΔP_s je nutno regulačním zásahem na měnič otáček všech nebo vybraných soustrojí posunout statickou charakteristiku zdrojů, v obr. 3.57. do bodu C. Elektrárny, které vyrovnávají výkon posouváním charakteristiky turbin, nazýváme regulačními elektrárnami. Tato regulace kmitočtu je označována jako sekundární a hovoříme potom o regulované ES.

Statické charakteristiky ES jsou nelineární, v rozmezí normálních kmitočtů se linealizují. U statické charakteristiky zatížení nedochází k větším odchýlkám, jiné situace je u statické charakteristiky zdrojů, zejména v oblasti velkých zatížení ES, kdy výkon všech soustrojí soustavy se blíží k jmenovitému, kde je statická charakteristika výrazně nelineární. V těchto případech soustrojí nemohou dále zvyšovat svůj výkon. Proto je potřebné při linearizaci statické charakteristiky zdrojů přihlížet k úrovni vytížení všech soustrojí soustavy, které vyjadřujeme činitelem poměrného zatížení soustavy, vyjádřené vztahem:

$$Z = \frac{P_z}{\sum P_{jm}} \quad (3.62)$$

Pro potřeby dispečerské praxe se z linearizovaných statických charakteristik ES zavádí výkonové číslo (samoregulační činitel). Výkonové číslo zatížení je vyjádřeno vztahem:

$$K_z = \frac{\Delta P_s}{\Delta f} = \frac{P_z}{f_n \cdot S_z} \quad [\text{MW/Hz}] \quad (3.63)$$

(znaménko plus je proto, že při poklesu kmitočtu klesne požadavek na zatížení)

Výkonové číslo zdrojů je vyjádřeno vztahem:

$$K_a = - \frac{\Delta P_a}{\Delta f} = \frac{P_a}{f_n \cdot S_T} \quad [\text{MW/Hz}] \quad (3.64)$$

(znaménko minus je proto, že při poklesu kmitočtu vzroste výkon turbosoustrojí).

Výkonové číslo ES je vyjádřeno vztahem

$$K_s = \frac{\Delta P_z}{\Delta f} \quad [\text{MW/Hz}] \quad (3.65)$$

Mezi výkonovým číslem ES a výkonovými čísly zdrojů a zatížení platí dle obr. 3.57. vztah:

$$\Delta P_z = \Delta P_a + \Delta P_s = -K_a \Delta f + K_z \Delta f = (-K_a + K_z) \cdot \Delta f \quad (3.66)$$

Dosažením do vztahu (3.65) obdržíme:

$$K_s = -K_a + K_z \quad (3.67)$$

Někdy se udává výkonové číslo ES v poměrných jednotkách. Za vztažný výkon se bere součet jmenovitých výkonů všech paralelně pracujících soustrojí P_c a za vztažný kmitočet $f_n = 50$ Hz. Potom platí:

$$K_s = \frac{\frac{\Delta P_z}{P_c}}{\frac{\Delta f}{f_n}} = \frac{\Delta P_z}{\Delta f} \cdot \frac{f_n}{P_c} = K_s \cdot \frac{f_n}{P_c} \quad (3.68)$$

Podobně je možno určit i výkonové čísla zatížení K_z a zdrojů K_a v poměrných jednotkách:

$$k_z = K_z \cdot \frac{f_n}{P_c} \quad (3.69)$$

$$k_a = K_a \cdot \frac{f_n}{P_c} \quad (3.70)$$

Neregulovaná ES se chová v ustáleném stavu jako statický člen s jednoznačnou závislostí změny kmitočtu a výkonu dle vztahu:

$$\Delta f = \frac{1}{K_s} \cdot \Delta P_z$$

V propojených neregulovaných ES platí obdobné, výše uvedené závislosti. Při m propojených soustavách lze výkonové číslo takového propojení počítat podle vztahu:

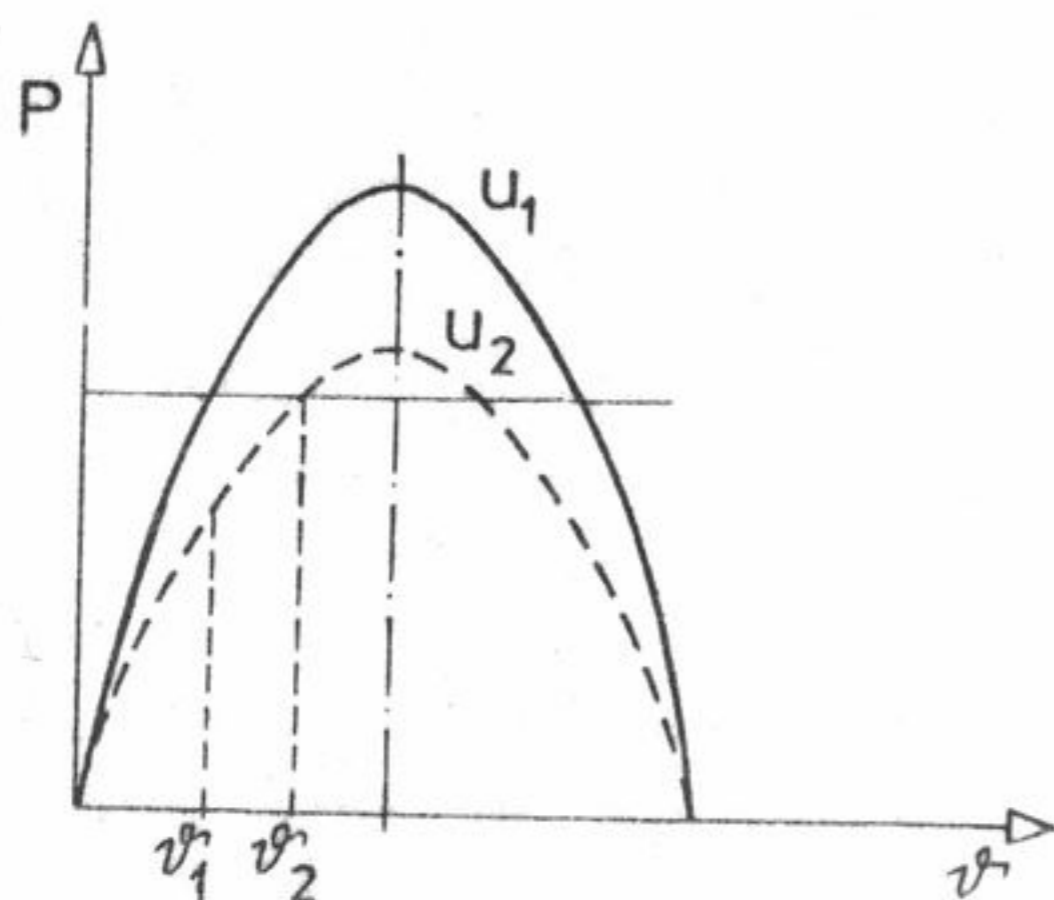
$$K = \sum_{i=1}^m K_{s1} \quad k_w = \frac{1}{s_t} \quad (3.71)$$

Napěťové statické charakteristiky

Protože jako při určování závislosti $f = F(P)$ stanovíme v neregulovaných ES statické charakteristiky $U = F(Q)$ zatížení a zdrojů; jejich průsečík určuje provozní stav ES. Na rozdíl od kmitočtu je napěťová statická charakteristika platná pouze pro omezenou oblast ES, protože jalové výkony nelze pro spotřebu přenášet na velké vzdálenosti.

Zdroji jalového výkonu v ES jsou synchronní alternátory, synchronní kompenzátory, přebuzené synchronní motory, kondenzátorové baterie a vedení vln při odlehčení.

V obr. 3.58. je uvedena závislost mezi činným zatížením alternátoru, napětím a zátěžným úhlem.



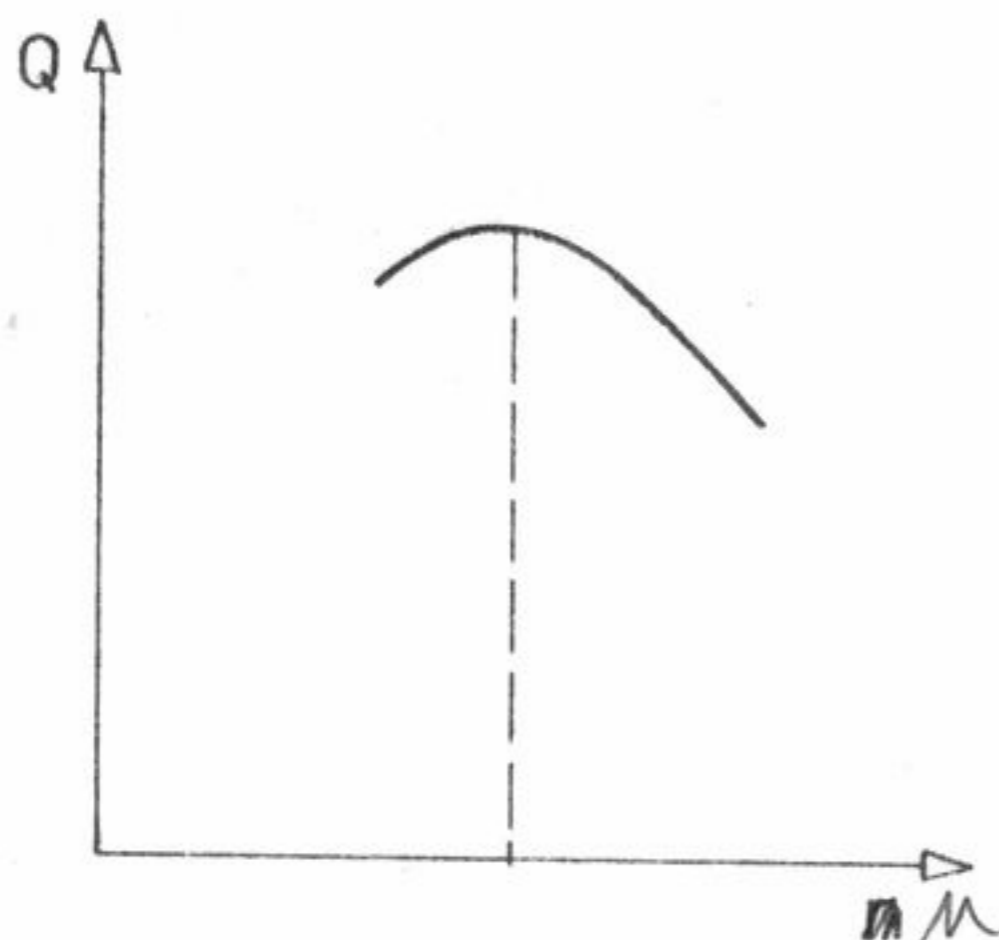
$$p = u \cdot i_{\zeta}$$

$$i_{\zeta} \cdot X_c = u_{if} \cdot \sin \varphi$$

$$p = \frac{u_{if} \cdot u}{X_c} \cdot \sin \varphi$$

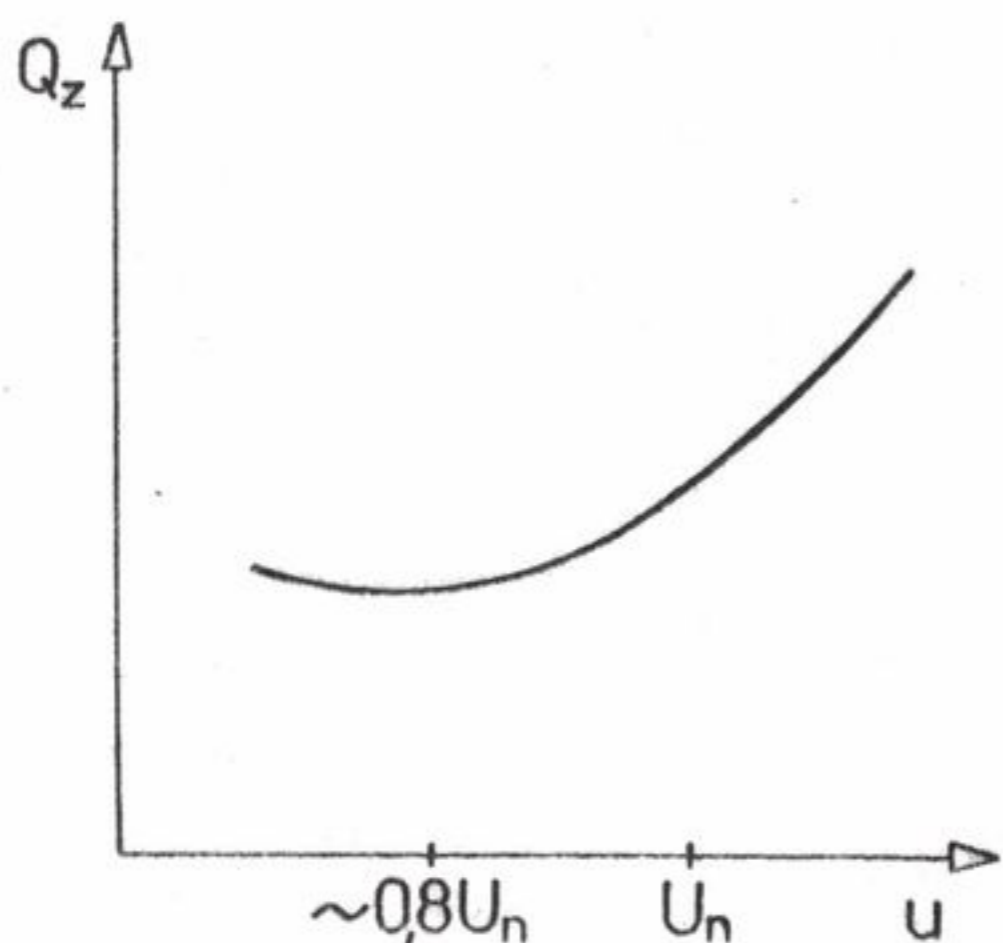
Obr. 3.58. Závislost činného zatížení alternátoru, napětí a zátěžného úhlu

Z uvedených vztahů lze při konstantním buzení stanovit statickou charakteristiku zdrojů $Q = f(U)$; příklad je v obr. 3.59



Obr. 3.59. Charakteristika $Q = f(U)$

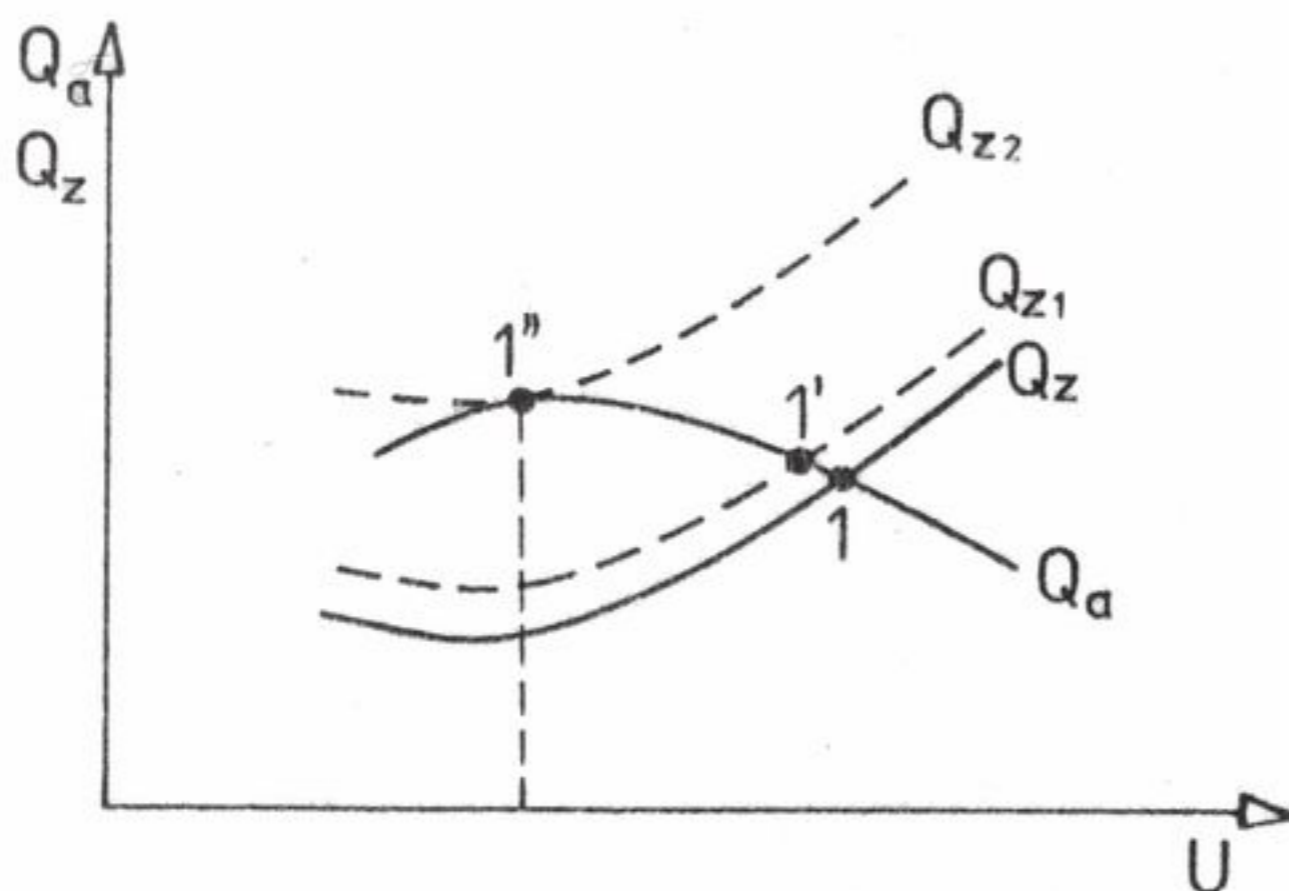
Statická charakteristika celkového zatížení je dána součtem charakteristik jednotlivých spotřebitelů (hlavními odběrateli jalového výkonu jsou transformátory a asynchronní motory). Příklad charakteristiky je v obr. 3.60.



Obr. 3.60. Charakteristika $Q_z = f(U)$

kde Q_z ... jalové zatížení

Ustálený provozní stav ES je určen průsečíkem statické charakteristiky zdrojů a statické charakteristiky zatížení, bod 1 v obr. 3.61.



Obr. 3.61. Statická charakteristika $Q = f(U)$ ES

kde : Q_a ... jalové zatížení zdroje

Při růstu jalového zatížení se posouvá statická charakteristika zatížení ve směru zvýšeného jalového výkonu (Q_{z1}). Pokud nedojde ke změně statické charakteristiky zdrojů snižuje se s růstem zatížení napětí v ES (v obr. 3.61 bod 1'), až dosáhne kritické hodnoty, bod 1''. Při dalším nárůstu jalové spotřeby roste velikost chybějícího jalového výkonu a současně se snižuje napětí ES, až dojde k úplnému zhroucení napětí v dané oblasti ES.

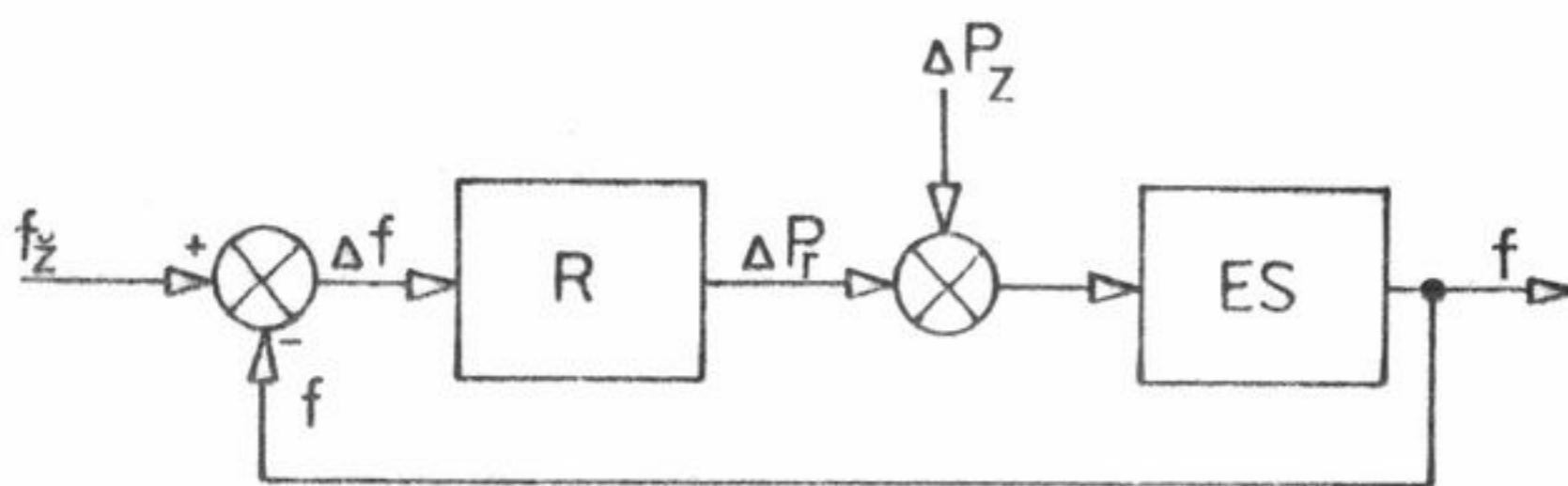
Regulace kmitočtu a předávaných výkonů

V regulovaných ES je nedostatek nebo přebytek činného výkonu vyrovnáván automatickou regulací kmitočtu (případně regulací f a P) zvýšením nebo snížením výkonu regulačních

elektráren, s cílem dodržení konstantního kmitočtu. V izolovaně provozované ES je regulován pouze kmitočet. V propojených ES se musí kromě kmitočtu udržovat na zadaných (smluvních) hodnotách též výkony předávané do ostatních ES (tzv. Saldo předávaných výkonů). V těchto případech je nutná regulace kmitočtu a předávaných výkonů. Od této regulace požadujeme udržování kmitočtu na žádané hodnotě, udržování smluvních předávaných výkonů, hospodárné rozdělování výkonů mezi jednotlivými stroji, elektrárnami a příp. elektrizačními soustavami.

Regulace kmitočtu v izolovaně pracující ES

Schema regulace kmitočtu je v obr. 3.62.



Obr. 3.62. Schema regulace kmitočtu

kde :

- f_z ... žádaná hodnota kmitočtu
- f ... skutečný kmitočet
- ΔP_z .. změna zatížení
- ΔP_r .. odchylka regulačního výkonu
- R ... regulátor

Regulační obvod je tvořen regulátorem kmitočtu a neregulovanou ES. Pro automatickou regulaci kmitočtu byla vypracována řada metod, které jsou modifikacemi dvou základních regulačních principů : regulace proporcionální (podle okamžitých odchylek kmitočtu) a regulace integrální (regulace podle integrálu okamžitých odchylek kmitočtu). Při všech metodách regulace je prováděn posun statické charakteristiky zdrojů $f = F (P)$. Statika (sklon) charakteristiky je určena nastavením primárního regulátoru otáček turbin. Posun charakteristiky (sekundární regulace) je zajišťován zvýšením nebo snížením množství páry (vody) jdoucí do turbíny. V dalším je uvedeno jen několik metod, nejvíce používaných .

Metoda statických charakteristik

U této metody je použit proporcionální regulátor, pro regulační soustrojí platí vztah :

$$\Delta P_r = - k \cdot \Delta f \quad (3.72)$$

$$\Delta P_r = P_r - P_z$$

$$\Delta f = f - f_{z1}$$

kde: P_r ... skutečný výkon regulačního soustrojí

P_z ... žádaný výkon regulačního soustrojí (konstantní)

Znaménko minus znamená, že při poklesu kmitočtu ($\Delta f < 0$) regulátor zvyšuje regulační výkon ($\Delta P_r > 0$). Při odchylce kmitočtu bude regulátor měnit výkon regulačního soustrojí, dokud nebude splněna regulační rovnice:

$$\Delta f + \frac{1}{k} \Delta P_r = 0 \quad (3.73)$$

resp. při zavedení součinitele statismu regulátoru kmitočtu S_r :

$$\Delta f + S_r \cdot \Delta P_r = 0 \quad (3.74)$$

Ve větších soustavách musí být rozdělován regulační výkon na větší počet soustrojí a rozdělení regulačního výkonu mezi jednotlivá soustrojí zjistíme z regulačních rovnic soustrojí:

$$\begin{aligned} P_{r1} &= -k_1 \cdot \Delta f \\ P_{r2} &= -k_2 \cdot \Delta f \\ &\vdots \\ P_{rn} &= -k_n \cdot \Delta f \end{aligned} \quad (3.75)$$

Z rovnice (3.75) vyplývá, že rozdělení výkonů na jednotlivá regulující soustrojí je nepřímo úměrné součinitelům statismu:

$$\Delta P_{r1} : \Delta P_{r2} : \dots = k_1 : k_2 : \dots = \frac{1}{S_{r1}} : \frac{1}{S_{r2}} : \dots \quad (3.76)$$

Výhodou regulace metodou statických charakteristik je její jednoduchost, protože výkon regulačních soustrojí závisí pouze na jednom parametru - kmitočtu, jehož hodnota je v celé soustavě stejná. Proto také není nutno budovat spojení mezi regulačními elektrárnami. Při poruše působí regulace ve smyslu udržení kmitočtu v ES. Vhodnou volbou součinitelů statismu možno docílit požadované rozdělení výkonu mezi regulační elektrárny (např. pro součinitel statismu regulátorů základních elektráren se volí hodnota $4 \div 6\%$, pro regulátory regulačních elektráren $0,5 \div 1,5\%$).

Metoda statických charakteristik má však i značné nevýhody a to, že kmitočty kolísají v širokých mezích, není vlastně regulován na konstantní hodnotu a jeho odchylka od jmenovité hodnoty se mění se stupněm zatížení regulačních elektráren. U této metody nelze zajistit hospodárné rozdělení výkonů na jednotlivé elektrárny (rozdělení je trvale proporcionální).

Metoda zdánlivě statických charakteristik

U této metody je na každém regulačním soustrojí regulátor kmitočtu, do kterého je zavedena další veličina, odchylka výkonu soustrojí od celkového výkonu regulačních strojů.

Regulační rovnice této metody lze vyjádřit vztahy:

$$\Delta f + S_1 \left(P_{r1} - \alpha_1 \sum_{i=1}^n P_{ri} \right) = 0 \quad (3.77)$$

$$\Delta f + S_K \left(P_{rK} - \alpha_K \sum_{i=1}^n P_{ri} \right) = 0$$

$$\Delta f + S_n (P_{rn} - \alpha_n \sum_{i=1}^n P_{ri}) = 0 \quad (3.77)$$

kde :

$\sum_{i=1}^n P_{ri}$... součet výkonů všech n regulačních soustrojí

α_k ... podíl k - této soustrojí na celkovém výkonu regulujících soustrojí

P_{ri} ... skutečný výkon prvního soustrojí

Podle podmínky :

$$\sum_{i=1}^n \alpha_k = 1 \quad (3.78a)$$

rovnováha mezi skutečným a žádaným zatížením :

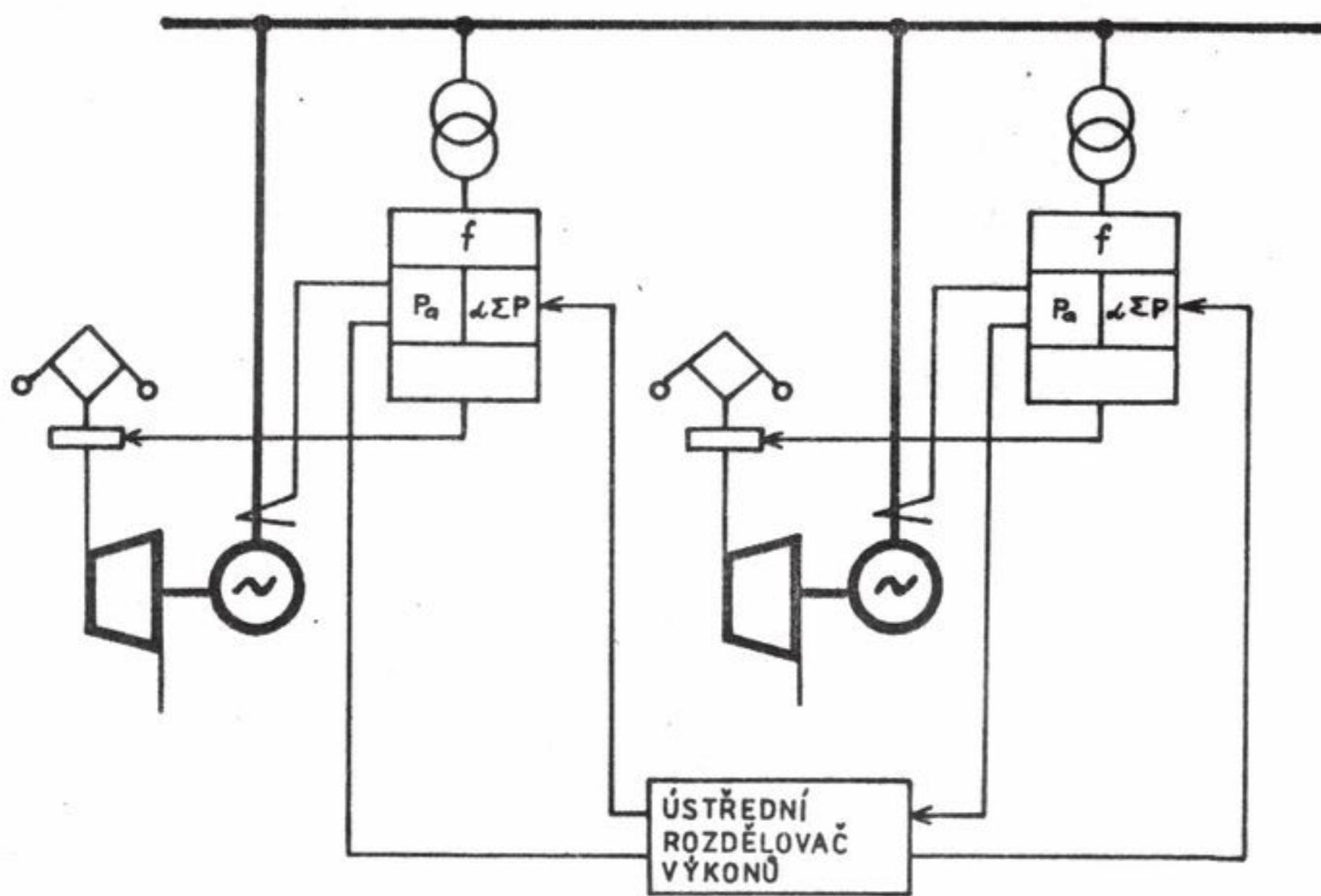
$$P_k = \alpha_k \sum_{i=1}^n P_{ri}$$

Vznikne při :

$$\Delta f = 0$$

Z hlediska regulace kmitočtu je tento způsob statický, z hlediska rozdělování výkonů na jednotlivé stroje je regulace statická, se součinitelem statismu jednotlivých soustrojí S_k .

V obr. 3. 63. je uveden příklad této metody pro dvě soustrojí .



Obr. 3.63. Příklad regulace kmitočtu

Nedostatkem této metody je uměrné rozdělování výkonů, které není obvykle z hlediska hospodárnosti nejvýhodnější. Při omezeném výkonu jednoho stroje nebo při jeho vyřazení zmenší se výkon ostatních soustrojí a regulační pochod se ukončí při nižším kmitočtu. Pro spojení regulačních elektráren s dispečinkem je zapotřebí měřicí a povelový spojovací kanál. Podíl jednotlivých elektráren na regulaci se určuje v ústředním rozdělovači výkonů. Z výše uvedených nedostatků se použití této metody pro několik elektráren nedoporučuje.

Metoda regulace podle synchronního času

Regulační rovnice této metody má tvar :

$$\Delta P_{ri} = -k_1 \int \Delta f \, dt \quad (3.78b)$$

kde :

$\int f dt \dots$ je odchylka synchronního času určeného kmitočtem ES od času astronomického

$$\int \Delta f_s \, dt = \int f_a \, dt - \int f_s \, dt = t_a - t_s = \Delta t_s \quad (3.79)$$

Regulační rovnice pro i-té soustrojí :

$$\Delta t_s + s_{ri} \cdot \Delta P_{ri} = 0 \quad (3.80)$$

I při této metodě je rozdělení regulačního výkonu na jednotlivá soustrojí v nepřímém poměru součinitelů statismu :

$$\Delta P_{r1} : \Delta P_{r2} : \dots = k_1 : k_2 : \dots = \frac{1}{s_{r1}} : \frac{1}{s_{r2}} : \dots \quad (3.81)$$

Volbou velikosti součinitelů statismu možno zvolit procento účasti daného soustrojí v regulaci.

Nevýhodou regulace kmitočtu podle synchronního času je pomalé působení na začátku regulačního pochodu. Regulace nereaguje okamžitě nastane-li odchylka kmitočtu, ale teprve až se trvajících odchylky kmitočtu nasčítají a projeví se z hlediska citlivosti regulace dostatečně velký odklon synchronního času od astronomického. Toto zpoždění odchylky synchronního času vůči změně zatížení a kmitočtu má nepříjemné důsledky pro průběh regulace. Vlivem zpoždění, než se nastřádá Δt_s působí regulátor dokonce nesprávně. Je to způsobeno tím, že např. při poklesu kmitočtu se snižuje výkon regulačních elektráren, jak vyplývá z rovnice pro $t = 0$ (vlivem primérních regulátorů $\Delta P_r = -k \cdot \Delta f$) :

$$\Delta P_r = -k \cdot \Delta f = -k \int \Delta f \, dt = 0$$

Na levé straně je v tomto případě znaménko plus a regulátor působí ve smyslu snížení výkonu regulačních elektráren. Teprve po určité době, kdy :

$$k \int \Delta f \, dt > k \Delta f$$

regulátor začne správně působit.

Pro odstranění tohoto nedostatku, zavádí se do regulační rovnice proporcionální člen (pro okamžitou odchylku kmitočtu) a vzniká tak kombinace statické regulace s regulací podle synchronního času. Regulační rovnice je vyjádřena takto :

$$\Delta P_{ri} + k_p \Delta f + k \int \Delta f dt = 0 \quad (3.82)$$

$$\Delta P_{ri} + \frac{\Delta f}{s_{pi}} + \frac{\Delta t_s}{s_{ri}} = 0$$

Pro správné působení regulátoru od počátku regulačního pochodu musí být součinitel statismu proporcionálního členu sekundárního regulátoru s_{pi} menší než součinitel statismu primárního regulátoru turbíny s_{ri} i-tého soustrojí.

Regulace kmitočtu v propojených ES

Regulace kmitočtu a předávaného výkonu má některé zvláštnosti oproti regulaci kmitočtu v jedné ES. Při zvýšení zatížení v jedné ES dojde k poklesu kmitočtu ve všech propojených soustavách, to znamená, že ve všech soustavách by začaly působit regulátory kmitočtu ve směru zvýšení výkonů regulačních elektráren. Tím by však vzrostly výkony předávané po spojovacích mezisystémových vedeních do postižené soustavy a mohly by překročit hodnoty maximálně dovolených výkonů těchto vedení z hlediska zachování statické stability paralelního chodu propojených ES.

Velikost výkonů předávaných po mezisystémových spojích je určena buď dohodami zúčastněných partnerů (smluvně) nebo velikost zatížení spojovacích vedení a plyne z požadavků nejehospodárnějšího provozu propojených ES. V prvním případě lze nejvýše docílit nejehospodárnější provoz jednotlivých ES, v druhém případě docílujeme nejehospodárnější provoz všech propojených ES jako celku. Ze závislosti mezi kmitočtem a činným výkonem plyne, že podmínky na dodržení předávaného výkonu kladou doplňující požadavky na regulaci kmitočtu propojených ES. Proto v propojených soustavách hovoříme o regulaci kmitočtu a předávaného výkonu. Nejrozšířenější metodou regulace f a P je metoda podle síťových charakteristik, kde je uplatněna zásada, že reguluje pouze ta ES, v níž došlo k narušení výkonové bilance.

Metoda síťových charakteristik

Regulační rovnice má pro soustavu tento tvar :

$$\Delta P_p + K \cdot \Delta f = 0 \quad (3.83)$$

kde :

ΔP_p ... odchylka předávaných výkonů od zadané hodnoty

Určíme podmínku pro K tak, aby neregulovala soustava, ve které nebyla narušena výkonová rovnováha. Při poklesu kmitočtu je předáván " uvolněný " výkon z neregulované ES, ve které nedošlo k narušení výkonové bilance do soustavy, kde rovnováha byla porušena. Předávaný " uvolněný " výkon je vyjádřen vztahem :

$$\Delta P_p = K_s \cdot \Delta f \quad (3.84)$$

kde :

K_s ... je výkonové číslo soustavy

Dosažením vztahu (3.84) do (3.83) obdržíme :

$$- K_s \Delta f + K \cdot \Delta f = 0$$

(uvolněný výkon má znaménko minus, protože jde směrem ze soustavy)

$$\text{odkud : } K = K_s \quad (3.85)$$

Podle odvozené rovnice (3.85) se nastaví činitele zesílení v regulátorech všech paralelně propojených ES, t.j. podle výkonového čísla příslušné ES. Regulátory mají obvykle charakter PI. Při větším počtu propojených ES nazýváme ΔP_p odchylkou od salda předávaných výkonů (kde saldo je algebraický součet všech předávaných výkonů dané ES) .

Regulace kmitočtu a předávaného výkonu v ES ČSSR

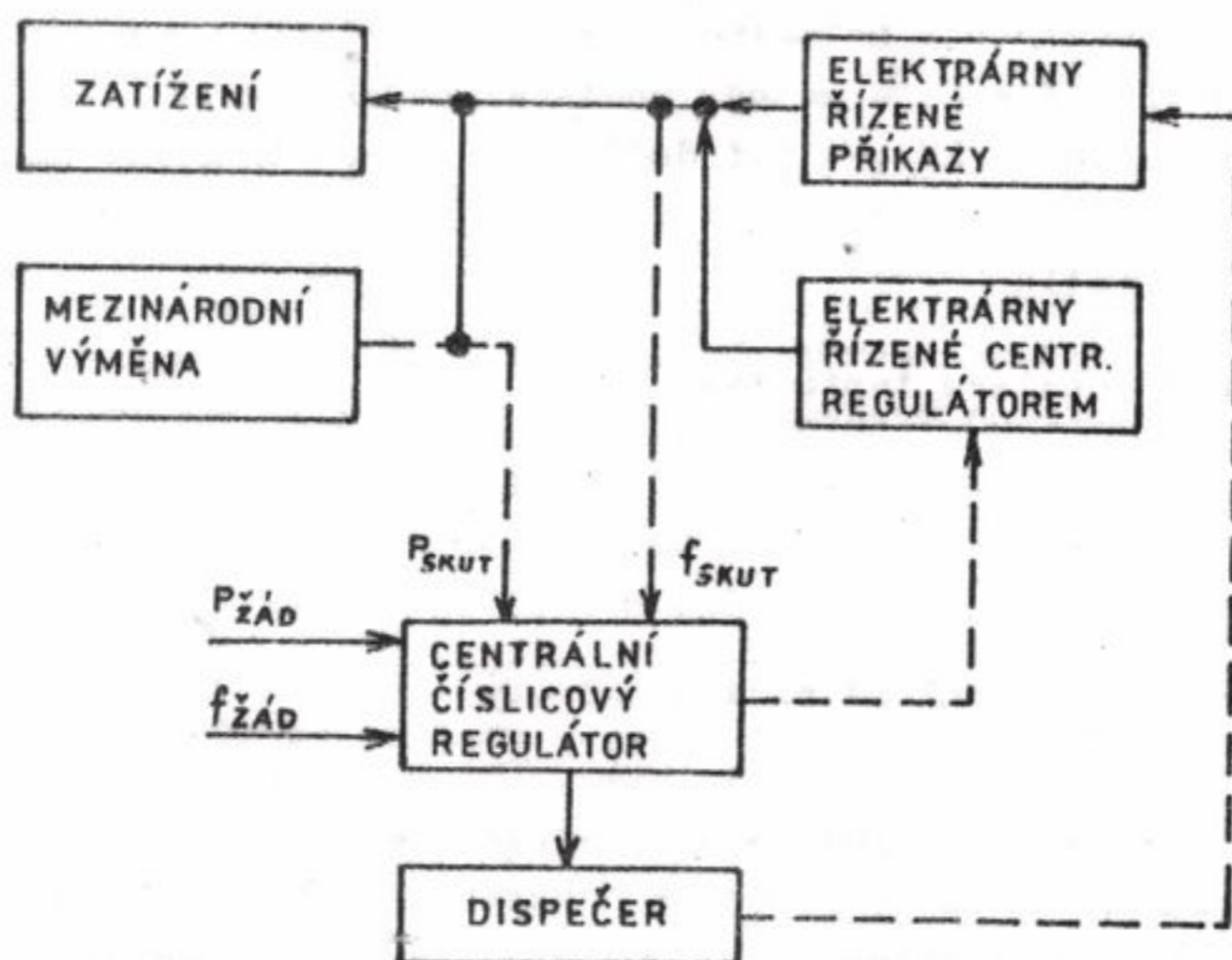
Elektrizační soustava ČSSR je propojena s ES členských zemí RVHP v soustavě Mír. Kmitočet a předávané výkony se regulují nyní podle metody síťových charakteristik. Regulace pracuje tak, že při změnách zatížení se všechny propojené ES podílejí na regulaci kmitočtu úměrné velikosti výkonového čísla příslušné ES (K) a vlastní změny zatížení vyrovnávají ty ES, ve kterých došlo k poruše. Regulační rovnice je vyjádřena takto :

$$\Delta P + K \cdot \Delta f = X$$

kde :

- Δf ... odchylka kmitočtu
- ΔP ... odchylka salda
- X ... regulační odchylka

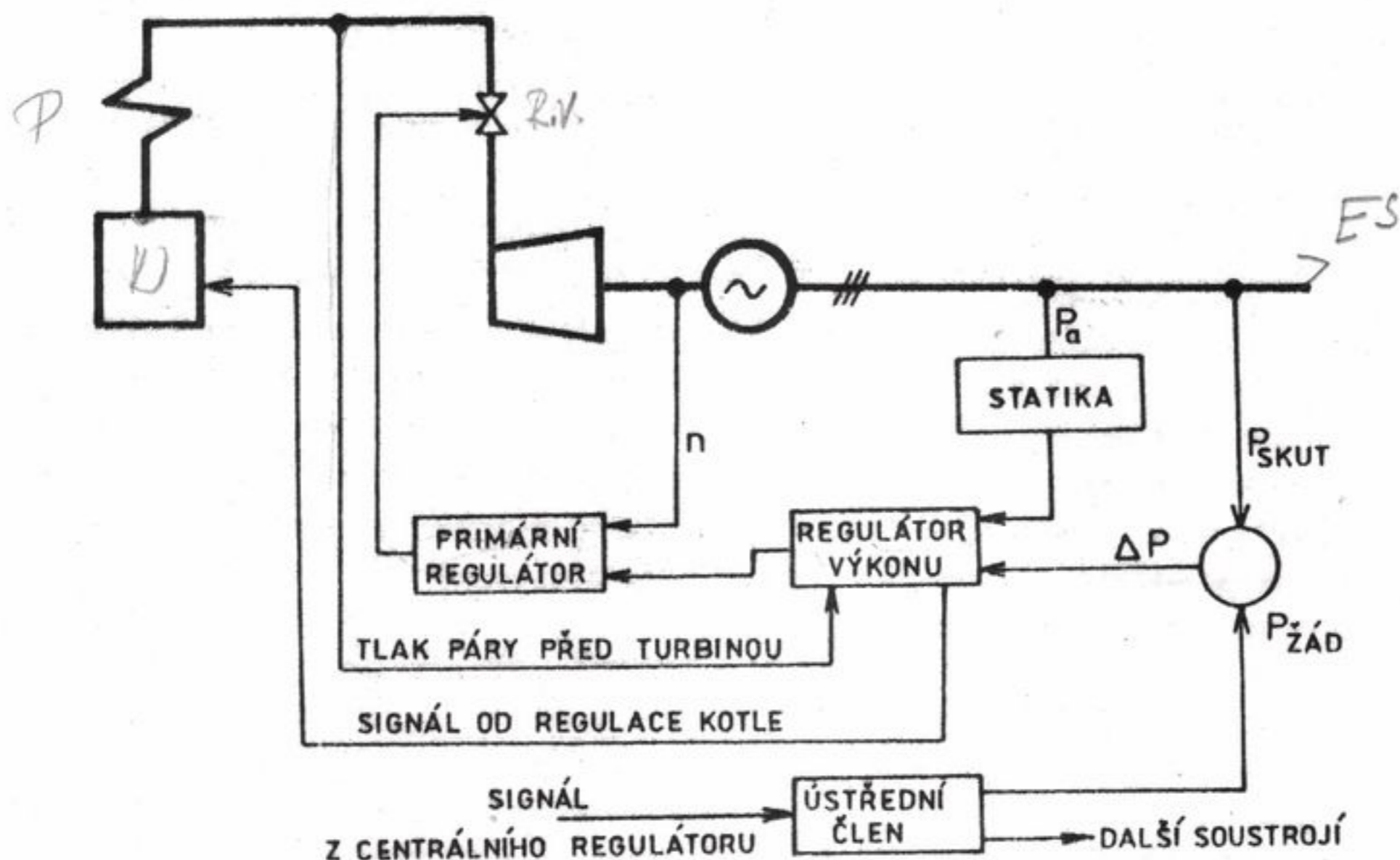
V obr. 3.64. je schematicky znázorněno řízení f a P s centrálním regulátorem, umístěným na Československém státním energetickém dispečinku.



Obr. 3.64. Vazba regulátoru a ES ČSSR

Centrální regulátor snímá každou sekundu vstupní údaje, salda výkonů z jednotlivých spojovacích vedení a kmitočet; každé 2s počítá regulační odchylku a jedná přímo řídí regulační elektrárny a jedná informuje dispečera o trendu změn f a P.

V obr. 3.65. je zjednodušené blokové schéma regulace výkonu v tepelné konvenční elektrárně.



Obr. 3.65. Schema regulace výkonu v regulační elektrárně

Signál z centrálního regulátoru dispečinku vyhodnocuje ústřední člen v elektrárně a určuje výkony pro jednotlivá soustrojí v elektrárně. Regulátor výkonu porovnává skutečný výkon bloku P_{skut} se žádaným výkonem $P_{žad}$ a podle odchylky řídí regulačními ventily přívod páry do turbin. Primární regulátor (regulátor otáček) je akčním členem regulátoru výkonu. Signál od tlaku páry před turbinou do regulátoru výkonu zajišťuje při velkých odchylkách tlaku snížení nebo zvýšení požadovaného výkonu tak, aby tlak dosáhl dovolenou hodnotu. Signál regulátoru výkonu do kotelní regulace zajišťuje pružnější změny výkonu kotle na požadované změny výkonu turbosoustrojí.

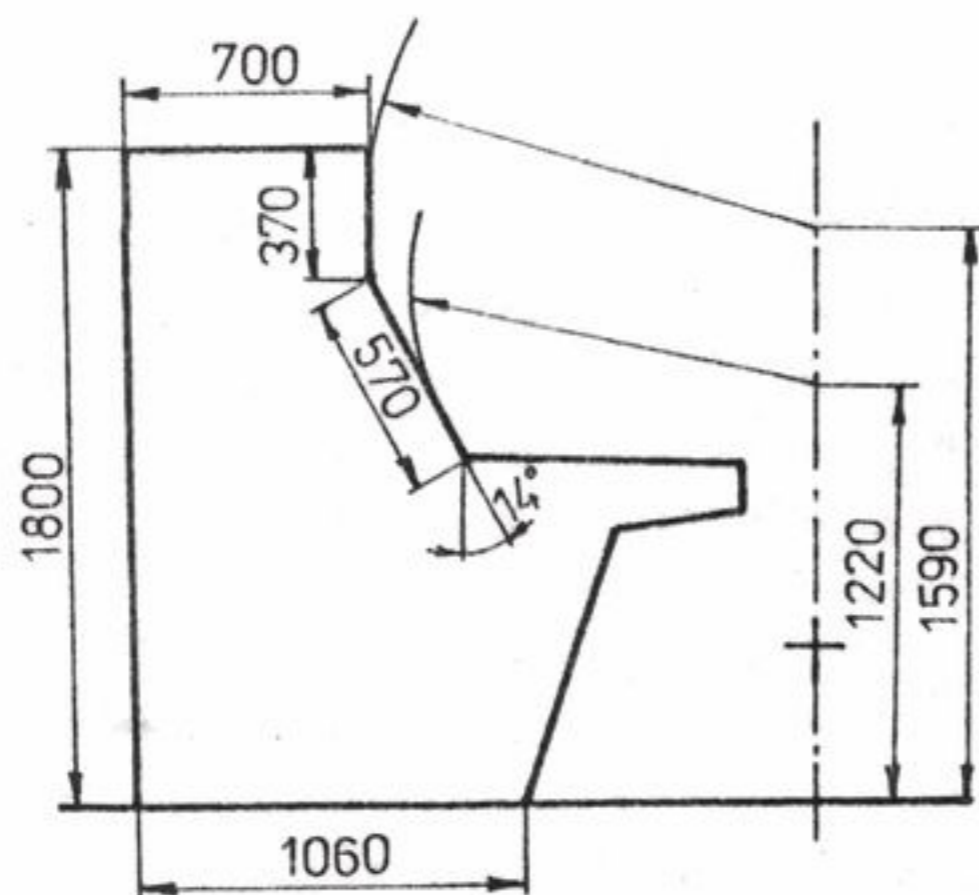
Pro regulaci f a P jsou vhodnější vodní elektrárny, u kterých je obvykle možná rychlost výkonové změny asi $1\% P_{jm} / s$. V ES soustavách s nižším podílem instalovaných vodních elektráren musí vykonávat regulaci f a P konvenční parní elektrárnské bloky, kde jsou přípustné rychlosti výkonových změn prakticky o řád pomalejší. U parních elektrárnských bloků, pracujících s vysokými parametry páry, je regulátor výkonu vybaven omezovačem rychlosti zatěžování. Podle doporučení stálé komise RVHP pro elektrickou energii musí elektrárnské bloky v regulačním rozsahu umožňovat neomezený počet změn výkonu o $10\% P_{jm}$ s rychlostí $2\% P_{jm} / s$ pro regulaci f a P při prodlevě mezi jednotlivými změnami minimálně 5 minut.

3.2.3. Bloková dozorna

Pro spolehlivý a hospodárny provoz elektrárnských bloků a elektrárny s minimálním počtem pracovníků má rozhodující význam zvolená koncepce řízení, určení optimálního počtu bloků řízených z jedné dozorny a umístění této dozorny. V dozorně jsou soustředěna zařízení

pro měření, ovládání, regulaci, signalizaci poruchových stavů, automaty a ochrany. Vzhledem k tomu, že kvalita a rychlost rozhodování operátora je značně závislá na prostředí ve kterém pracuje, jsou kladeny na dispoziční řešení a vybavení dozoren vysoké nároky. V dozorně musí být zajištěn optimální prostor pro potřebné zařízení, které musí být účelně uspořádáno z provozního, architektonického a ergonomického hlediska. Další hlavní požadavek je na vhodnou klimatizaci, aby byly zajištěny požadované mikroklimatické podmínky: optimální teplota vzduchu (19 až 25°C), relativní vlhkost (30 až 70 %), čistota a dostatečná výměna vzduchu. Hladina hluku nemá v dozorně přesahovat 40 dB (vyžaduje provedení dvojitých dveří, dvojitých popřípadě i trojitých skel v oknech, obložení stěn dozorny materiály pohlcující zvuk apod.). Dalším požadavkem je vhodné osvětlení (300 až 1000 lx), nejlépe s možností regulace pro přizpůsobování očí operátora. Současně s návrhem osvětlení je třeba věnovat velkou pozornost barevnému řešení ploch pracoviště.

Vlastní pracoviště operátora musí mít správně volené rozměry a vhodně rozmístěné sdělovače a ovladače. Při návrhu rozměrů je nutno respektovat antropometrické hodnoty člověka a jeho psychické vlastnosti. Podle průzkumu operátor při obsluze bloku asi 33 % času stojí a 67 % času sedí a je proto třeba pracoviště operátora navrhnout tak, aby vyhovovalo obsluze v obou polohách. Pro operátory elektrárenských bloků se nejčastěji používá pult s pultovým nástavcem a štítem nebo pult se zvýšeným nástavcem. V obr. 3.66. jsou doporučené rozměry pultu pro průměrnou výšku pracovníka 172 cm.



Obr. 3.66. Rozměry pultů

Přednost pultu s pultovým nástavcem a štítem je ve větší ploše pro umístění přístrojů.

Velmi důležitý je výběr a rozmístění přístrojů na hlavním pracovišti operátora. Podle psychologických výzkumů dosahuje operátor nejlepších výsledků při odečítání přístrojů, které jsou umístěné ve středu pozorovaného pole nebo v levém horním rohu. Je proto třeba do těchto prostor umisťovat přístroje pro měření nejdůležitějších parametrů, které charakterizují bezpečnost zařízení (hladina vody v kotli, teploty přehřáté a přihráté páry, podtlak v topeništi apod.); nejdůležitější regulátory, které stabilizují technologické parametry a určují provozní spolehlivost zařízení (např. regulace rychlosti turbíny, regulace

napájení apod.). Při návrhu pracoviště operátora třeba vhodně umístit transparenty poruchové signalizace, dostatečné velikosti, aby umožnily operátorovi rychlé a dobře čitelné informace. Z psychologického hlediska je vhodné používat na ovládacím pultu jak tlačítka, tak i říditka.

Bezprostředně při dozorně je třeba vybudovat sociální zařízení pro operátory.

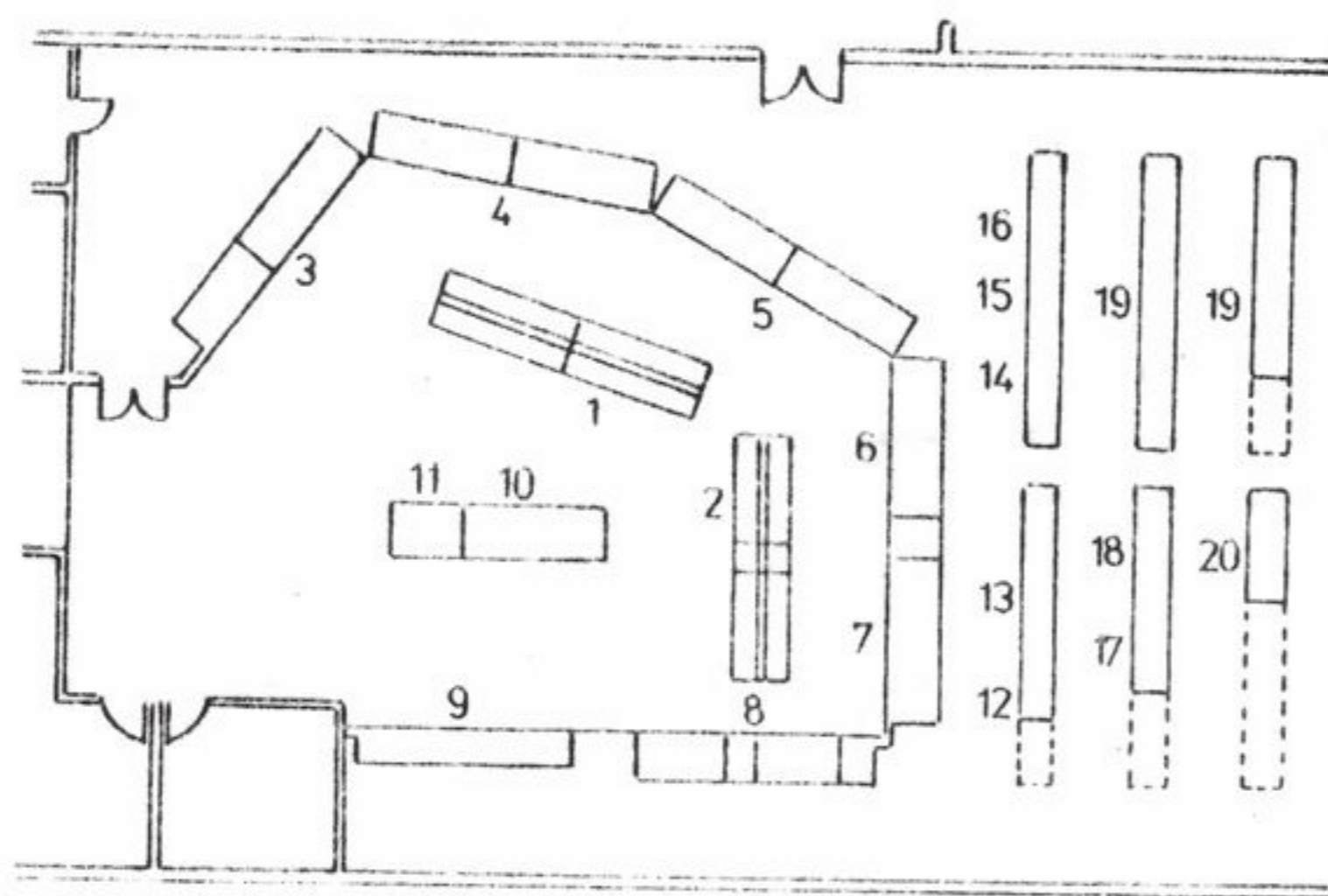
Příklady provedení dozoren

Počet bloků, řízených z jedné dozorny nelze zevšeobecnit a musí být řešen individuálně pro konkrétní podmínky. V ČSSR v konvenčních elektrárnách jsou realizovány jedno, dvojblokové i tříblokované dozorny. V SSSR jsou bloky 200 MW a 300 MW řízeny z dvojblokových dozoren. V NDR, PLR, NSR, Francii většinou převládá koncepce dvojblokových dozoren. V Anglii jsou dozorny konvenčních bloků 500 MW umístěné excentricky a z jedné dozorny se řídí čtyři bloky.

Přechodem na bloky velkých jednotkových výkonů se značně snížil význam samostatných elektrických dozoren. Technologické řízení je prováděno z blokované dozorny, výkon z blokových transformátorů je obvykle vyveden přímo do vhodných míst elektrizační soustavy; v těchto případech, pokud není součástí elektrárny rozvodna vvn se vypouští vybudování samostatné elektrické dozorny elektrárny. U tohoto řešení je blokovaná dozorna současně pracovištěm operátora elektrické části bloku pro řízení vlastní spotřeby elektrické energie.

Elektrárny, vybavené čs. bloky 200 MW poslední generace, jsou řízeny z dvojblokových dozoren. V dozorně jsou pro každý blok dvě oddělená pracoviště. Hlavní pracoviště je umístěno na pultu operátora, vedlejší pracoviště, umístěné na pomocném tablu slouží k ručnímu, dálkovému řízení ventilů, klapek, motorů atd. Kromě toho je zde umístěna poruchová a dotazová signalizace, jakož i informace o poloze akčních členů. Na hlavním pracovišti jsou pro každý blok instalovány dvě alfanumerické zobrazovací jednotky a panel operátora pro dialog s číslicovým informačním systémem CIS 3000. Podrobnější popis řídicího systému je uveden v části 3.2.4. Kromě vlastních blokovaných dozoren jsou v těchto elektrárnách vybudovány další samostatné kontrolní a řídicí dozorny pro pomocné provoz.

Jako další příklad je v obr. 3.67 uvedena dozorna jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem.



Obr. 3.67. Půdorys dozorny jaderné elektrárny

Popis k obr. 3.67. :

- 1 - ovládací pult reaktoru
- 2 - ovládací pult turboalternátorů
- 3 - řídicí panel bezpečnostního systému reaktoru
- 4 - řídicí panel pomocných provozů reaktoru
- 5 - primární okruh reaktoru
- 6 - řídicí panel turboalternátoru 1
- 7 - řídicí panel turboalternátoru 2
- 8 - řídicí panel rozvodu vlastní spotřeby
- 9 - přístrojový panel pro nukleární zařízení
- 10 - počítač
- 11 - komunikační spoje
- 12 - zapisovače
- 13 - ventilace sekundárního okruhu
- 14 - ventilace primárního okruhu
- 15 - kontrola záření
- 16 - poloha řídicích tyčí
- 17 - požární hlásiče
- 18 - centrální kontrola teplot
- 19 - havarijní hlásiče
- 20 - elektroměry

Dozorna je rozdělena na tři části :

- řídicí pulty : zde jsou umístěny nejdůležitější ovládací prvky, regulátory a přepínače řízených veličin a měřicí přístroje pro řízení normálního provozu ; poplachové hlášení;
- panely dozorní : obsahují mnemotechnické schéma zařízení, ovladače, měřicí přístroje, regulátory a registrační přístroje pro jednotlivé systémy; odtud se najíždí a odstavuje zařízení elektrárny; je zde řídicí a přístrojové vybavení havarijního dochlazování reaktoru;
- pomocné panely : jsou mimo zorné pole operátorů; obsahují řídicí a signalizační panely pro pomocné systémy, jako jsou ventilátory, požární hlásiče, elektroměry apod.

3.2.4. Komplexní automatizace elektráren

Zvyšování jednotkových výkonů elektrárenských bloků, jak konvenčních tak i jaderných, je spojeno se značnou složitostí technologického zařízení. Roste počet kontrolovaných parametrů a přístrojů pro měření, signalizaci, ochrany, ovládní a regulaci. Tyto počty dokumentuje následující tabulka :

| Výkon bloku [MW] | 50 | 100 | 200 | 500 | 800 |
|--|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| Kontrolované parametry (tlaky, teploty, průtoky atd.) | 200-300 | 400-600 | 600-800 | 1100-1300 | 1500-1600 |
| Regulační obvody | 15-30 | 40-50 | 60-80 | 100-120 | 130-200 |
| Ovládání armatur a pohonů | 100 | 140 | 300 | 800 | 1400 |

Tab. 8. Počet kontrolovaných parametrů, ovládacích a regulačních povelů pro jednotlivé bloky

Rostoucí potřeba přístrojového vybavení znesnadňuje obsluhu, znemožňuje rychlé shromáždění a zpracování informací potřebných pro spolehlivý a optimální provoz. Velký počet sledovaných přístrojů, ovládacích orgánů dosahuje nebo i překračuje schopnost obsluhy k rychlé analýze situace. Musí proto automatizace v elektrárnách přinést nejen hospodářský užitek a zvýšení kvality dodávané energie, ale také ze sociologického hlediska odlehčit člověka od jednotvárné rutinní fyzické a duševní práce.

Při řešení řídicího systému elektrárny je nutno si uvědomit, že do systému řízení náleží i člověk a ty technické prostředky, které mu řídicí činnost umožňují, t.j. sdělovače a ovladače.

Pod pojmem sdělovače rozumíme vše, co obsluze předává informaci: snímače s přímým ukazováním, měřicí a registrační přístroje, signální žárovky, poruchové transparenty, číslicové displeje, obrazovkové zobrazovací jednotky. Do skupiny ovladačů náleží vypínače, přepínače, tlačítka a potenciometry. Soubor sdělovačů s kabeláží a snímači tvoří informační systém. Soubor prostředků pro ruční a automatické řízení tvoří řídicí systém. Řídicí systém může nabýt nejrůznějších forem a proto je vhodné tato kategorizace:

- a/ ruční řízení z místa od technologického zařízení (dříve používané tzv. kotelní a turbinové štíty),
- b/ dozorny s dílčí automatickou regulací, blokádami a ochranami,
- c/ blokové dozorny s úplnou automatickou regulací, blokádami, ochranami, případně sekvencními automaty,
- d/ blokové dozorny jako v bodě c/ s řídicím počítačem, který může pracovat v těchto funkcích:
 - 1/ sběr zpracování a vyhodnocení údajů, jejich předávání obsluze na vyžádání, automaticky (při překročení mezí) a periodicky (výjezdový provozní protokol) ,
 - 2/ funkce dle bodu 1/ a dále výpočet tepelně-ekonomických ukazatelů bloku (operativní, za směnu, den, měsíc),
 - 3/ funkce jako v bodě 1/ a 2/ a dále optimalizace provozních parametrů v ustáleném provozu, číslicová regulace,
 - 4/ funkce jako 1/ až 3/ a dále číslicové řízení bloku ze všech provozních stavů včetně dynamické optimalizace, tzn. výběr nejoptimálnější cesty při přechodu z jednoho provozního stavu na druhý .

Soudobé konvenční řízení elektrárenských bloků umožňuje udržet parametry technologického procesu na žádaných hodnotách, není možno však automaticky spouštět a odstavovat celý blok. Řízení bloku je centralizováno v blokových dozornách. Pomocné provozy se řídí z místních dozoren. Důležité parametry z blokových a místních dozoren mohou být přenášeny do centrální dozorny, odkud se řídí elektrárna s vazbou na dispečink elektrizační soustavy. Použití miniaturizace, signalizace ovládacích orgánů, stavebnicové systémy regulace a kontrolních zařízení, snižují sice potřebné rozměry dozoren, ale problém optimálního řízení ve všech provozních stavech neřeší. Regulace zajišťuje stabilizaci výrobního procesu, ale nezahrnuje výběr požadované změny na základě počátečních nebo pracovních hodnot veličin. Náročné požadavky na bezpečné a optimální řízení vyžadují, aby řídicí systém vytvářel vzájemně závislou soustavu, což konvenční řízení neumožňuje. Nové cesty řízení velkých bloků jsou ve vhodné aplikaci samočinných počítačů. Použití řídicích počítačů v elektrárnách se stále rozšiřuje. Jejich pružnost umožňuje programově realizovat nejrůznější řídicí funkce od rozvětvených a víceparametrových systémů a sekvenčních algoritmů až ke statickým a dynamickým optimalizačním výpočtům.

Pro řídicí systémy velkých elektrárenských bloků můžeme určit tyto základní úkoly :

a/ Informační systém

Sběr, zpracování a předání dat obsluze, které jsou nutné pro provoz bloku, včetně výpočtů provozních ukazatelů a tepelné bilance, údajů potřebných pro údržbu, zápisů provozního protokolu, kontroly přípustných mezí jednotlivých parametrů, zápisu průběhu poruch a další.

b/ Spouštění a odstavování bloku

Řízení funkce spouštěcích a odstavovacích automatů všech úrovní s pevným programem, přímé číslicové řízení s pružným programováním s cílem racionálního spouštění bloku s využitím plných pevnostních a deformačních možností materiálu jednotlivých součástí (kritických míst) při bezpečném dlouhodobém provozu zařízení v projektované životnosti a minimalizaci ztrát energie při spouštění.

c/ Automatický provoz bloku v regulačním rozsahu

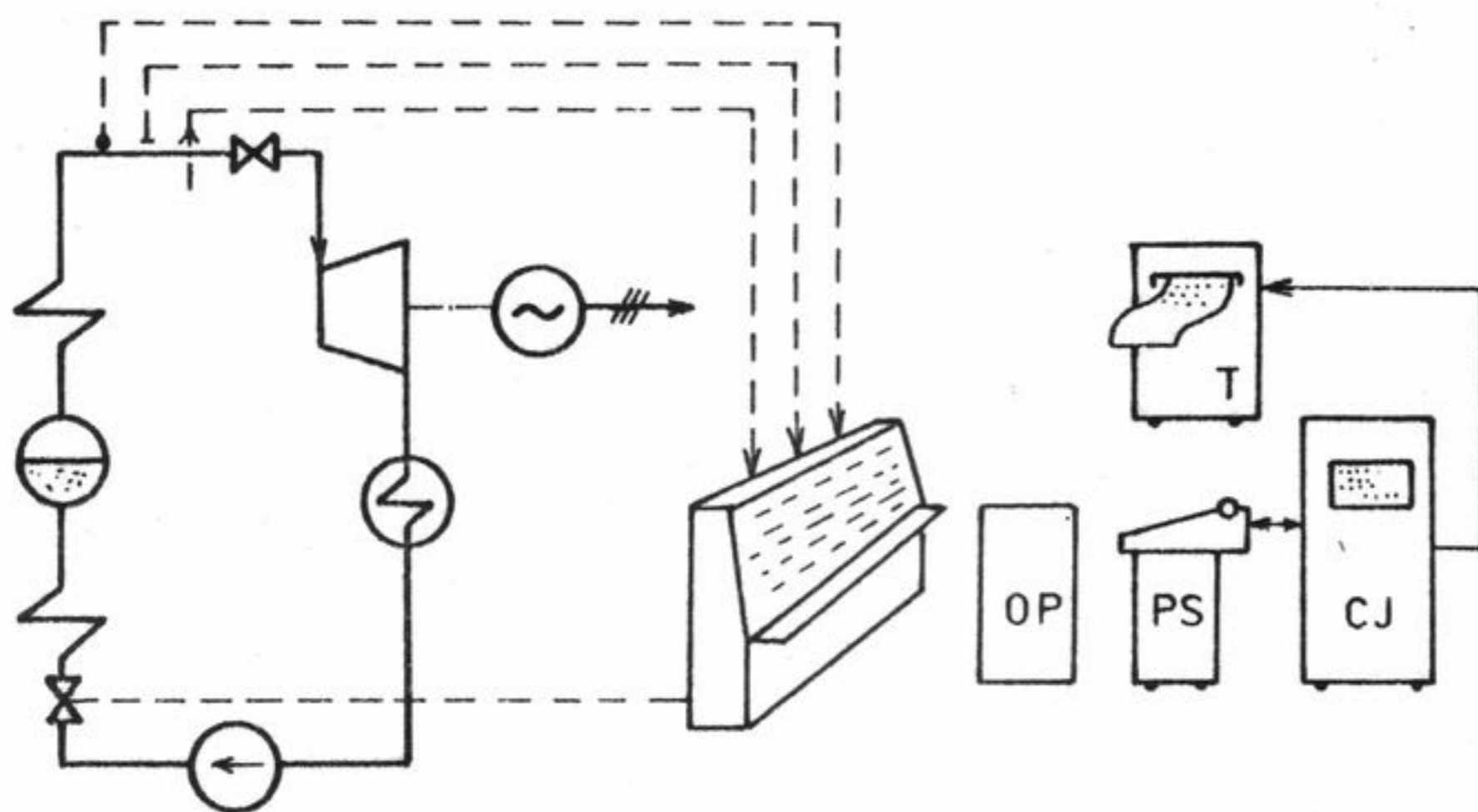
Automatická regulace jednoduchých, rozvětvených a víceparametrových obvodů s cílem optimalizace provozu z hlediska spolehlivostních a ekonomických ukazatelů; provoz bloku v regulaci kmítočtu a předávaných výkonů.

Kromě výše uvedených základních úkolů může počítač vykonávat i funkce, které jsou analogovou technikou nebo obsluhou prakticky nerealizovatelné. Jsou to : adaptivní regulace, extrémální regulace, statická a dynamická optimalizace provozu.

V použití číslicového počítače pro řízení technologického procesu elektrárny možno určit dle způsobu jeho spojení se strojním zařízením tyto základní aplikace :

1/ Použití počítače mimo proces (off-line)

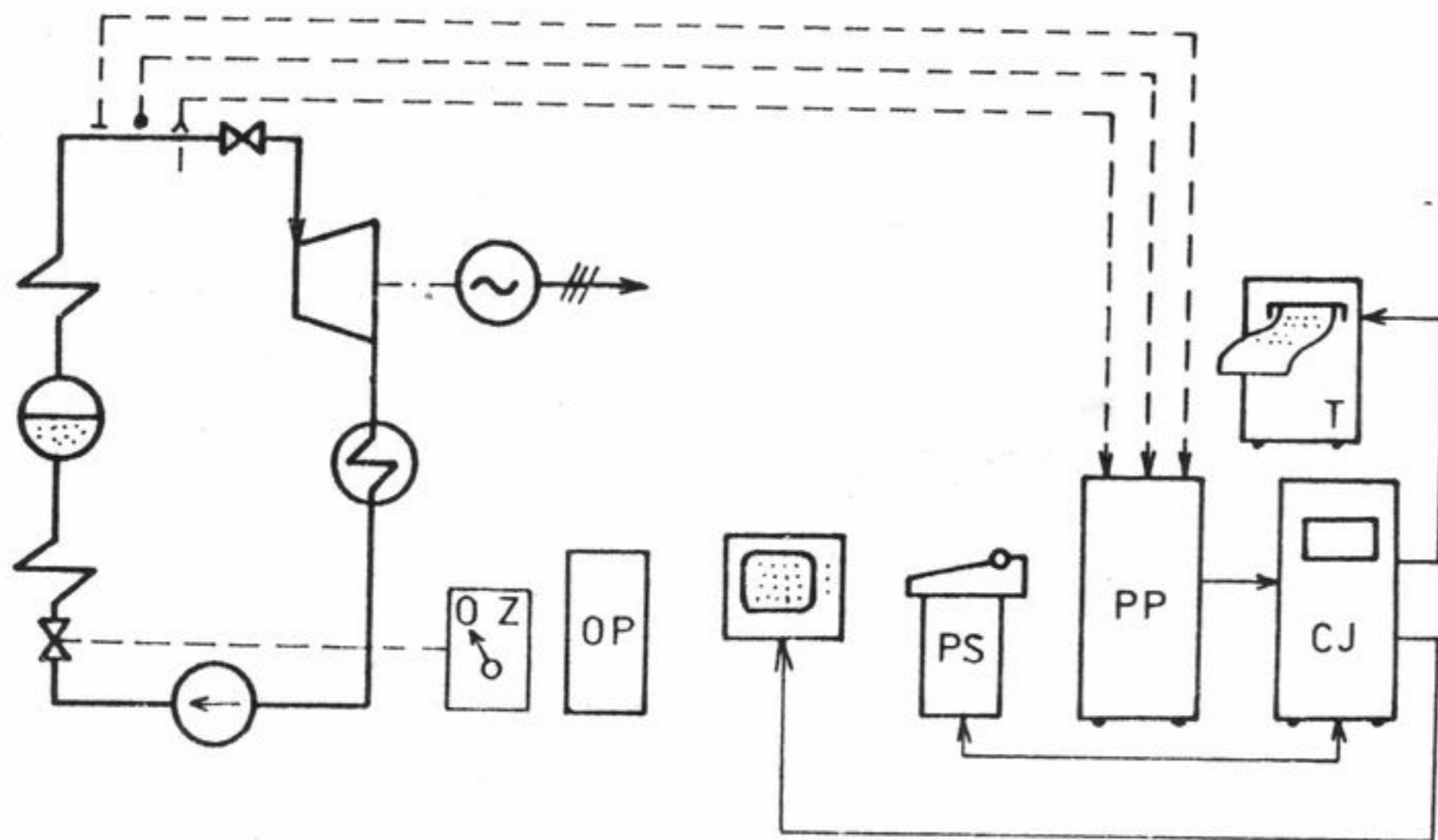
Při použití počítače dle obr. 3.68. zavádí vstupní data člověk. Počítač je použito ke stanovení charakteristických veličin (ukazatelů, tepelné bilance) a řadě dalších výpočtů. Na základě výstupních výsledků pak provádí korekce procesu člověk. K vlastnímu řízení bloku je použita konvenční analogová technika.



Obr. 3.68. Řízení s použitím počítače mimo proces

2/ Použití počítače v otevřené smyčce (opened / loop)

Počítač je pomocí vstupní strany, jednotky styku s prostředím, pevně spojen s technologickým procesem (obr. 3.69). Provádí sběr informací a jejich vyhodnocení. Výsledky předává pomocí některých standartních periferních zařízení obsluze. Tento způsob zapojení počítače je v současné době zatím v elektrárnách nejrozšířenější.

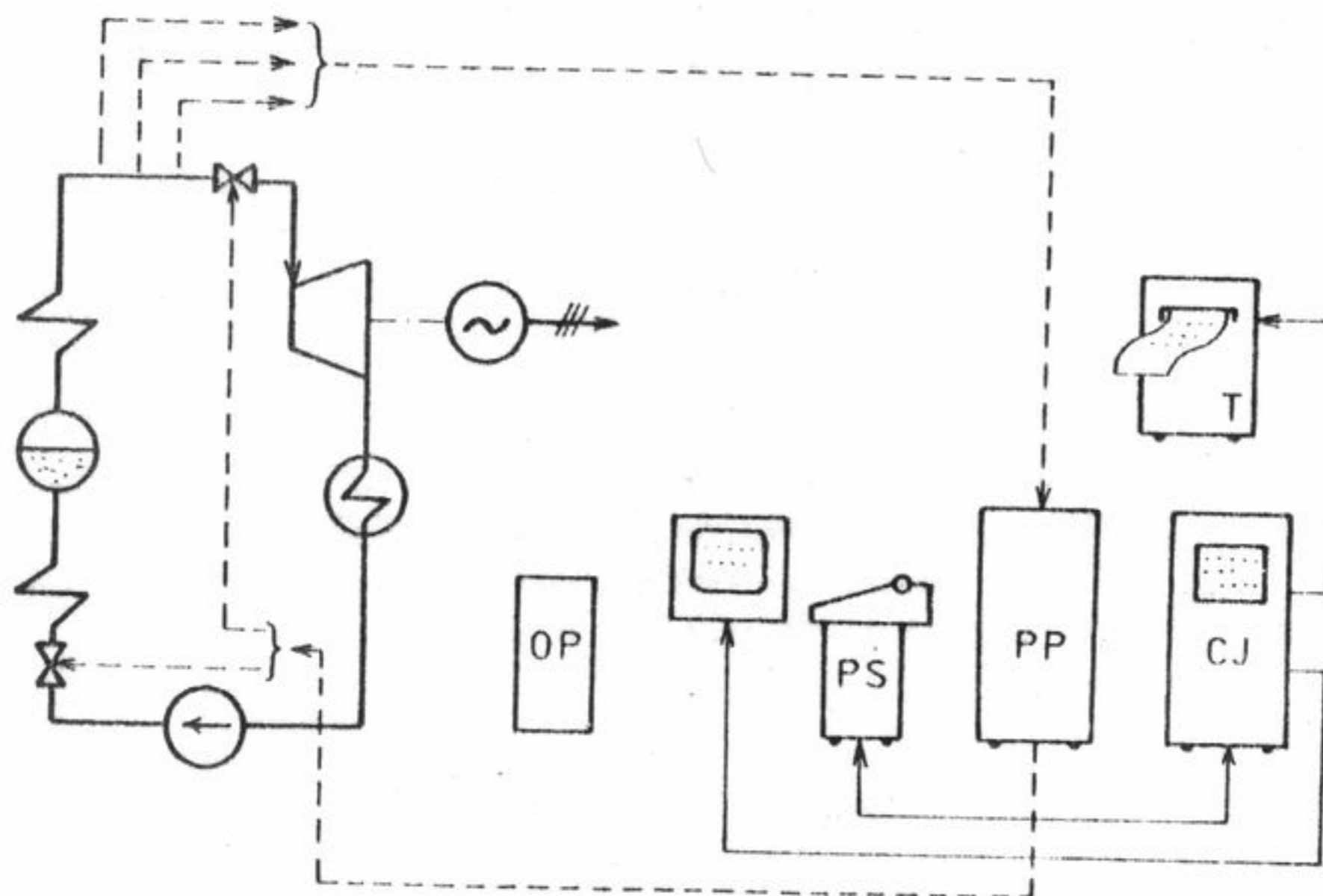


Obr. 3.69. Použití počítače v otevřené smyčce

3/ Použití počítače v uzavřené smyčce (closed-loop)

Zde je počítač s technologickým zařízením spojen jak svou vstupní tak i výstupní stranou. Tato řídicí úroveň může být realizována buď ve spojení s analogovými regulátory nebo jako přímé číslicové řízení. Zapojení v prvním případě je též známo pod označením " supervisory control " nebo " digitally directed analog control " . Počítač provádí sběr, redukci, zpracování dat, výpočty nejlepších provozních podmínek a přestavuje podle výpočtů automaticky žádané hodnoty analogových regulátorů a koordinuje činnost sekvenčních a kombinačních automatů. U tohoto zapojení jsou zachovány konvenční analogové regulátory.

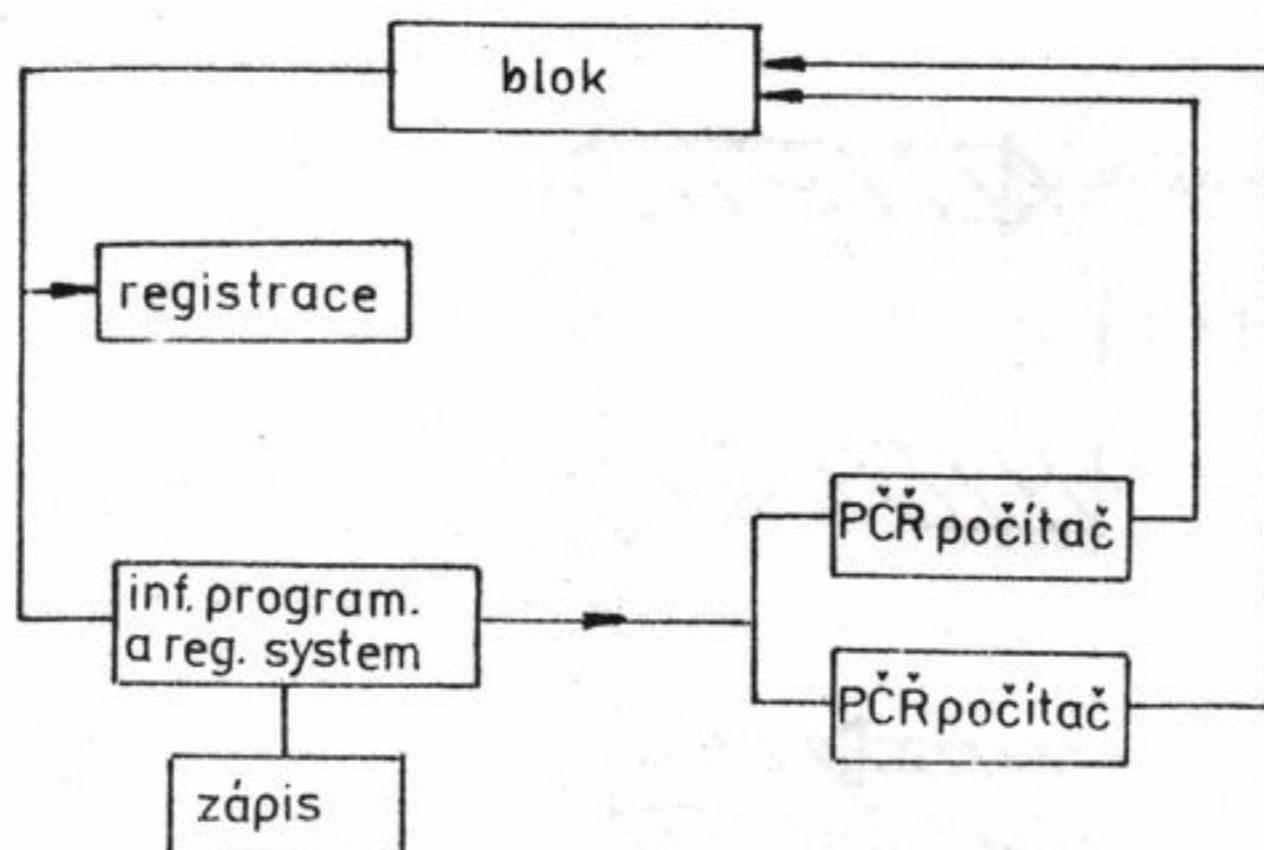
V druhém případě je počítač nasazen pro přímé číslicové řízení (direct digital control). Počítač vedle sběru a zpracování dat nahrazuje spojitě pracující regulátory, provádí vlastní regulaci a řízení celého systému .



Obr. 3.70. Použití počítače v uzavřené smyčce

Zapojení řídicího počítače do nejnižší automatizační úrovně procesu vyžaduje proti úkolům zpracování dat a optimalizace řešení nových problémů. Nejdůležitější je zajištění řízení procesu při výpadku počítače. Může být provedeno paralelním použitím spojitě regulace u důležitých obvodů nebo zdvojením počítače.

Směr vývoje, vezme-li se v úvahu rostoucí spolehlivost počítačů, zavádění malých řídicích počítačů, mikropočítačů a problematickou ekonomii sekvenčních automatů, složitých analogových regulátorů spěje k použití malých řídicích počítačů pro autonomní celky bloku koordinovaných nadřazeným počítačem pro účely řízení a realizaci komplexního informačního systému (obr. 3.71)



PČŘ ... přímé číslicové řízení

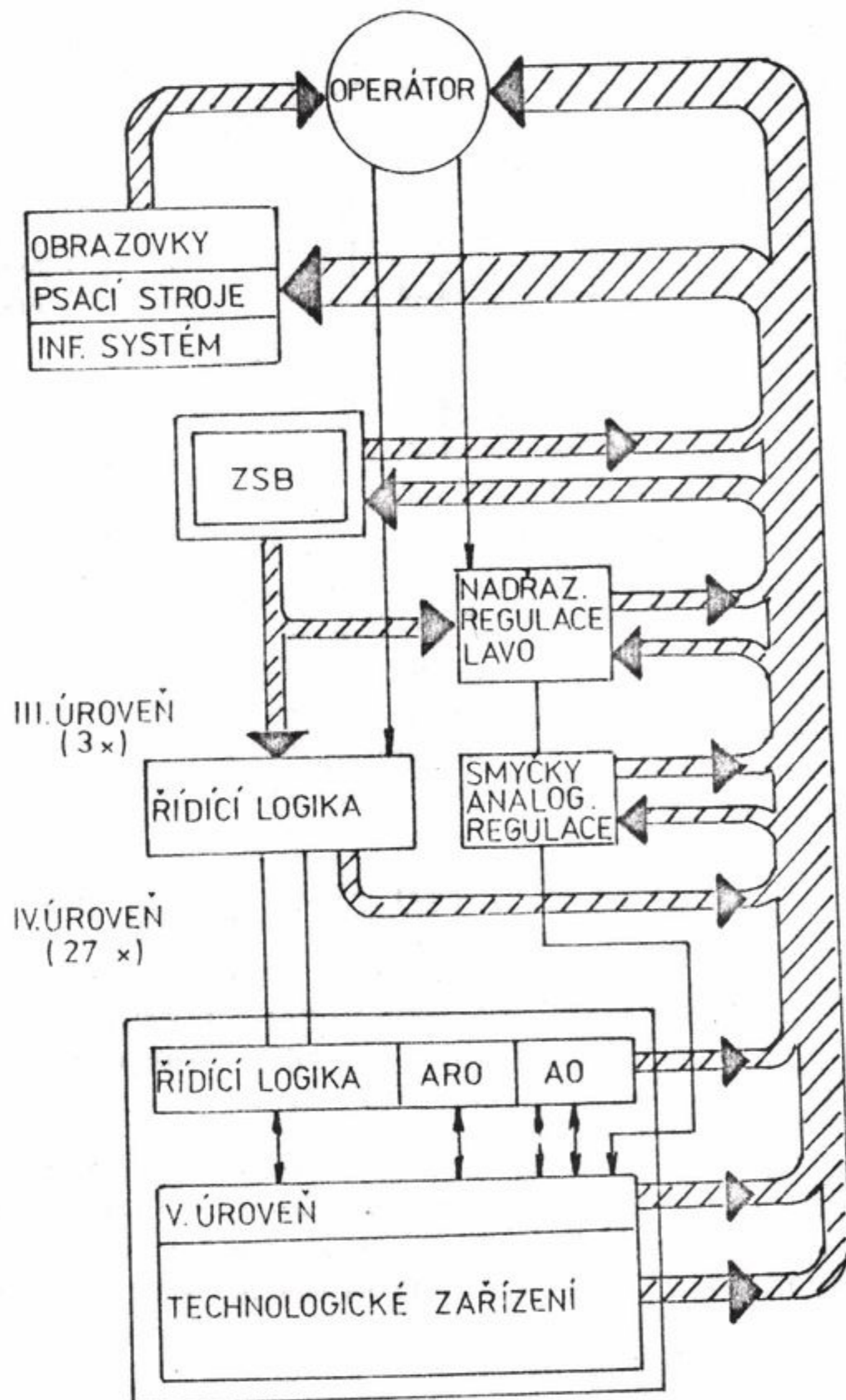
Obr. 3.71. Použití malých řídicích počítačů

Výše uvedené úrovně řízení představují základní směry řešení řídicích systémů. V praktické realizaci dochází k určitým obměnám a kombinacím.

Příklad řídicího systému bloku 200 Mw

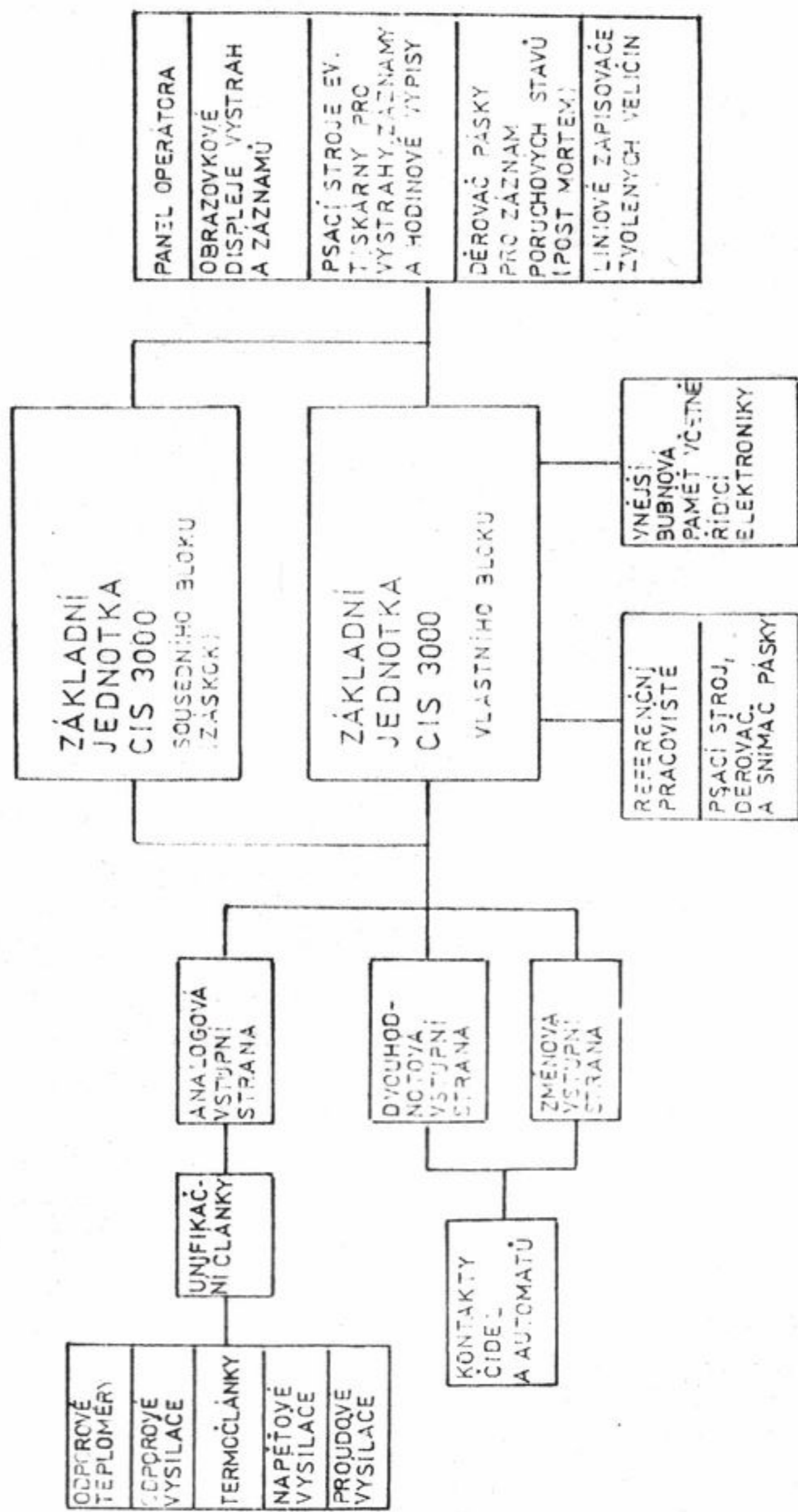
Uveden příklad realizace přístrojového vybavení pro ASŘ TP čs. elektrárenských kondenzačních bloků 200 Mw. Řídicí systém je koncipován v několika úrovních a je tvořen jednodušeovými logickými automaty, analogovými regulacemi s nadřazenými logickými a výpočetními obvody (LAVA) a komplexním zabezpečovacím systémem bloku (ZSB). Přenos informací je zajištěn číslicovým informačním systémem CIS 3000. Strukturní schema informačního a řídicího systému je v obr. 3. 72.

Číslicový informační systém CIS 3000 snímá měřené analogové veličiny, sleduje dvouhodnotové vstupní veličiny, zajišťuje prvotní zpracování měřených veličin, kontrolu překročení mezí, zpracování veličin a přípravu dat pro výstupní zařízení, jako jsou obrazovkové zobrazovací jednotky, hlášení a výstrahy, výpis na psacích strojích a záznam na registračních přístrojích.



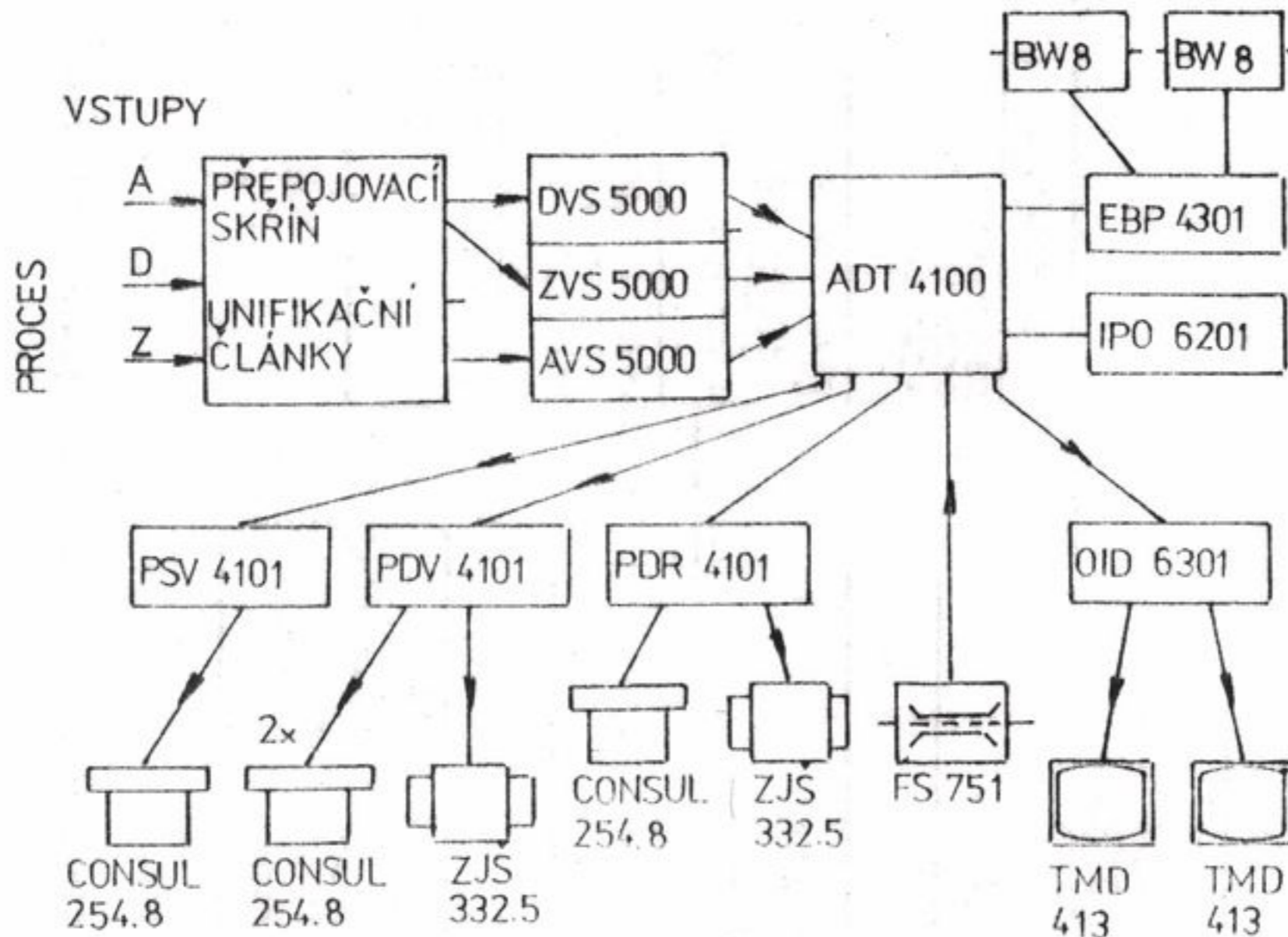
Obr. 3.72. Strukturní schéma informačního a řídicího systému

Základem informačního systému je malý počítač (ADT 4000), který podle vloženého programu řídí sběr a zpracování informací a všechna vnější zařízení. Systém je stavebnicový a umožňuje vytvořit sestavu podle požadavků dané aplikace. Organizace systému je na blokovém schéma, na obr. 3.73.



Obr. 3. 73. Zjednodušené blokové schéma číslicového informačního systému CIS 3000

Celková sestava CIS 3000 pro blok 200 MW v obr. 3.74.



Obr. 3.74. Sestava CIS 3000 pro blok 200 MW

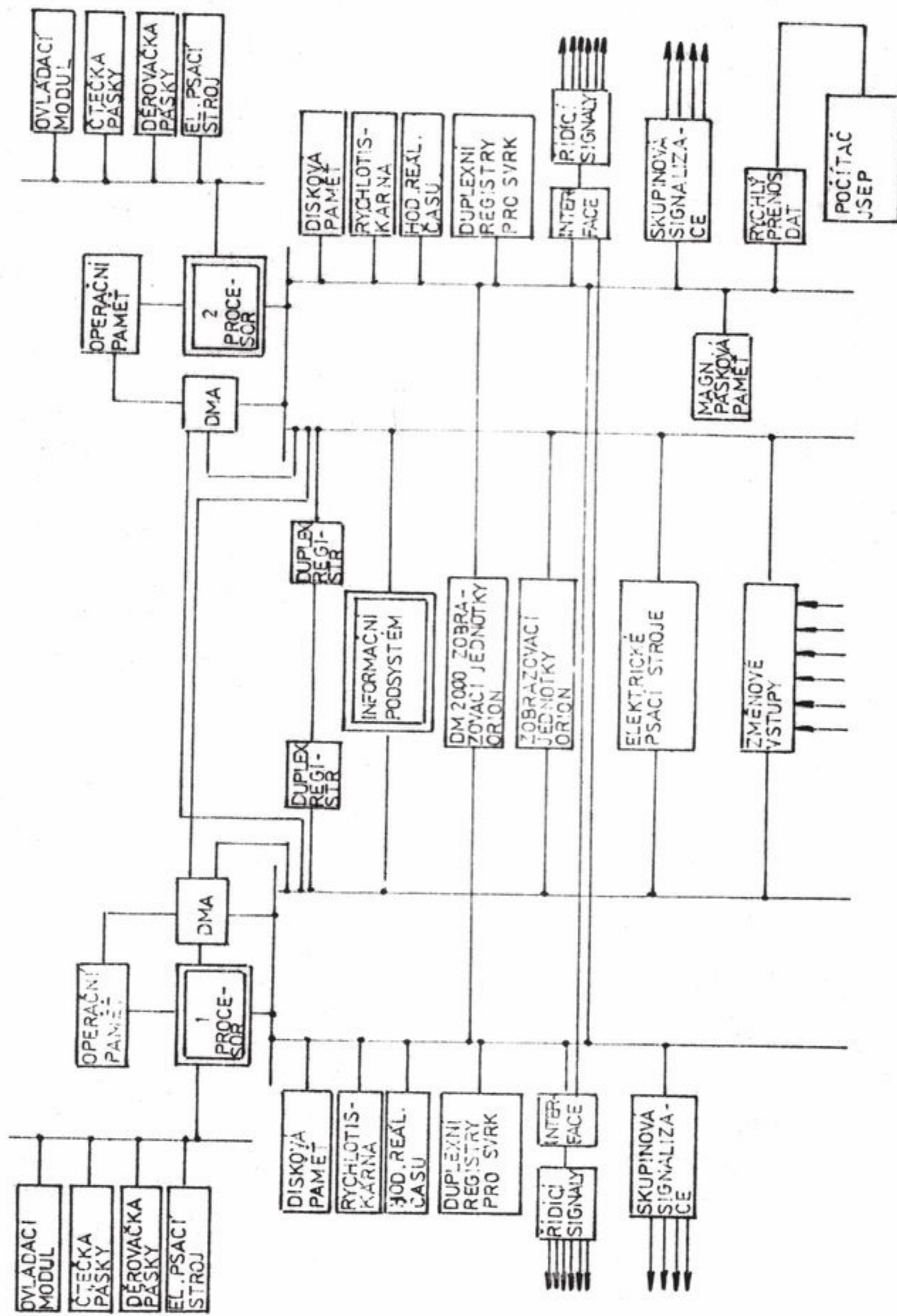
Jedním počítačem je snímáno 850 analogových veličin, z toho za normálního provozu pro jeden blok je určeno 590 veličin a v záskokovém provozu u druhého bloku 260 veličin. Dvouhodnotových veličin je snímáno celkem 1400, z toho za normálního provozu pro jeden blok 900 a v záskokovém provozu druhého bloku 500 veličin.

Aplikace počítačů v jaderných elektrárnách

Dosud nasazené počítače v primárním okruhu jaderných elektráren zpracovávají informační systém a pracují jako " rádce operátora ". Vychází se ze zřesady, že použití počítače má zajistit technické a ekonomické zlepšení provozu jaderné elektrárny. Při výpadku počítače dojde jen ke zhoršení některých provozních parametrů, ale elektrárna může být dále provozována. Nasazení řídicích počítačů v sekundárním okruhu je v zahraničí používáno nejen pro informační systém, ale např. i pro přímé číslicové řízení turbosoustrojí. Tato koncepce nasazení počítačů je charakteristická pro jaderné elektrárny, uváděné do provozu v letech 1965 - 1975. Poslední zkušenosti z elektráren, kde počítačový systém je zálohován ukazují, že pohotovost takového systému je vysoká a proto se perspektivně počítá s větším uplatněním počítačů v jaderných elektrárnách. Splnění požadavků jaderné bezpečnosti vyžaduje, aby pro různé informační a řídicí funkce byly použity nezávislé zálohované počítače.

Počítačový informační systém Komplex Uran 2

Tento systém je použit pro funkce informačního systému bloků jaderných elektráren VVER 440 s reaktory V 213, s výstupem informací pro operátory v blokové dozorně a ve společné dozorně reaktorovny. Je složen ze dvou podsystémů, informačního a výpočtového, obr. 3.75.



Obr. 3. 75. Systém Komplex Uran

Informační podsystém tvoří dvě vzájemně plně zálohované jednotky M-60, zahrnující prostředky pro sběr analogových signálů (počet 2048) a dvouhodnotových vstupních signálů (3000) z procesu, jejich úpravu, normalizaci a převod do číslicového tvaru s možností kontroly vybraných 2 x 128 veličin na zadané mezní hodnoty. Výstupní informace ze systému M60 jsou zavedeny :

- v analogovém tvaru na víceúrovňové ukazovací přístroje,
- v diskrétním tvaru pro signalizaci mimolimitních stavů na klavesnicích volby pro jednotlivé přístroje,
- v číslicovém tvaru pro přenos do výpočtového podsystému.

Výpočtový podsystém je tvořen dvěma propojenými počítačovými systémy, z nichž každý obsahuje dva procesory SM-2 s celkovou operační pamětí 128 k slov a vnější diskovou kazetovou pamětí à 5 M slov. Obě centrální části výpočtového podsystému jsou v technických prostředcích symetricky vybaveny a umožňují vzájemný záskok tzv. operativních funkcí. K oběma částem výpočtového systému jsou připojeny obrazovkové zobrazovací jednotky (Orion - M a DM - 2000), psací stroje pro záznam a bloky interface pro vstup informací z procesu.

Informace o technologickém procesu dostává výpočtový podsystém jednak v číslicovém tvaru nepřímo, prostřednictvím jednotek pro styk se spolupracujícím systémem (2x M-60, systémem vnitroreaktorové kontroly SVRK, systémem pro dosimetrickou kontrolu Sejval), jednak v diskrétním tvaru ve formě tzv. iniciativních signálů (změnové vstupy), zavedených přímo do výpočtového podsystému (cca 560 signálů) .

Každá ze čtyř obrazovkových zobrazovacích jednotek (barevné, grafické) umožňuje na volbu zobrazení cca 70 technologických schémat bloku.

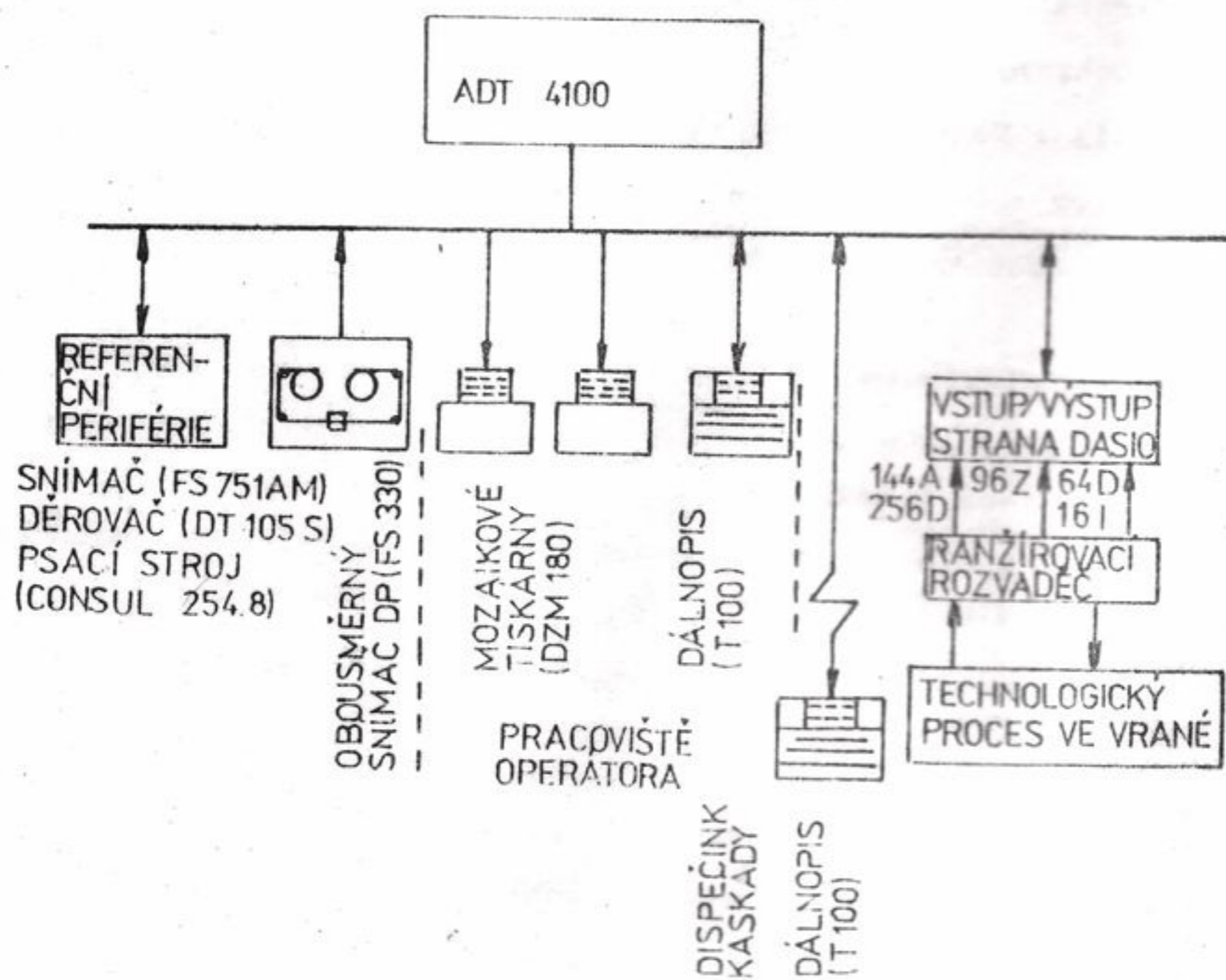
Řízení vodní elektrárny počítačem

Uveden příklad aplikace nasazení počítače pro informační a řídicí systém menší průtočné vodní elektrárny (dvě vertikální soustrojí, Kaplanovy turbíny), posledního stupně kaskády elektráren, kde je hlavním úkolem této elektrárny vyrovnávání odtoku vody z kaskády.

Informační systém, řešený řídicím počítačem, zajišťuje komplexní informace o stavu technologického zařízení elektrárny, včetně zjišťování a dokumentování mimotolerančních, havarijních stavů, zpracování vybraných veličin do 24 hodinové bilance a přenos informací na dispečink. Řídicí systém zajišťuje tyto funkce : skupinový číslicový regulátor soustrojí vodní elektrárny (optimalizace počtu soustrojí pro provoz, povelová logika, regulace činného a jalového výkonu), číslicová regulace dolní hladiny (řídicí veličinou žádaná hodnota dolní hladiny, akční veličinou regulace je průtok elektrárnou), regulace napětí v rozvodně 110 kV, ovládní vypínačů rozveden 110 a 22 kV, optimalizace vazby oběžného a rozváděcího kola turbin.

Pro řízení je použit počítač ADT 4100, obsahující : procesor s rozšířenou aritmetikou, operační paměť 32 k slov a přenosovou jednotku, osazenou základním a volitelným vybavením (kontrola parity, 2 kanály DMA, výpadek sítě, reálný čas, ochrana paměti, snímač FS 751 A (M), snímač děrné pásky FS 330 , děrovač DT 105 S, referenční psací stroj, tiskárna DZM 180, registr 16 bit in, registr 16 bit out, dálnopis T 100, vstup / výstupní strana Dasio).

Schema přístrojového vybavení tohoto systému je v obr. 3.76 .



Obr. 3. 76. Konfigurace řídicího systému vodní elektrárny

L I T E R A T U R A

1. Trojánek : Provoz elektrizační soustavy, skripta I. V. ČEZ, Pardubice 1976.
2. Trojánek : Elektrická část elektráren, skripta ČVUT, Praha 1970.
3. Fejt, Čermák : Elektroenergetika, skripta ČVUT 1981 Praha.
4. Matěna : Výroba a rozvod elektrické energie, SNTL Praha 1975.
5. Dohnálek : Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, ALFA Praha 1978.
6. Hora, Navrátil : Regulace elektrických strojů, SNTL Praha 1976.
7. Měřička, Zoubek : Obecná teorie elektrických strojů, SNTL Praha 1973.
8. Ibler, Pánek : Počítače a jejich použití v energetice, skripta I. V. ČEZ, Pardubice 1982.
9. Ibler : Provoz elektrárenských bloků, skripta I. V. ČEZ, Pardubice 1980.
10. Beran : Elektrické ochrany strojů a zařízení elektrizační soustavy, skripta VŠSE Plzeň, 1979.
11. Vokůrka a kol. : Spolehlivost silnoproudých schemat vlastní spotřeby parních elektráren, Výzkumná zpráva EGÚ Praha 1975.
12. Žížek : Synchronní stroje se supravodivým budícím vinutím, Výzkumná zpráva VVZ ETD Škoda Plzeň 1973.
13. Marko, Darula, Pavelka : Elektrotechnická zařízení jaderných elektráren, učební text, Jaslovské Bohunice 1980.
14. Skokan, Hodoušek : Provoz elektrozařízení elektráren, skripta I. V. ČEZ, Pardubice 1975.
15. Kripner, Tříška : Pohony v parních elektrárnách, SNTL Praha 1957.

Další použité materiály :

- Sborníky z odborných konferencí VTS.
- Technické zprávy EGP Praha.
- Technický zpravodaj Škoda Plzeň.
- Výzkumné zprávy VŠSE Plzeň, KVE.
- Výzkumné zprávy ORGREZ Praha.
- Československé normy.
- Provozní předpisy pro alternátory a transformátory v elektrárnách.

factory diagram

Název: Elektrárny II

Autor: Prof. Ing. Zbyněk Ibler, DrSc.,
Ing. Miloš Beran, CSc.

Vydavatel: VŠSE v Plzni - ediční středisko

Určeno: pro studenty IV. ročníku FE

Veřejná katedry: Prof. Ing. Zbyněk Ibler, DrSc.

Povoleno: min. škol. v Praze dne 25.4.72, č.j.1184

Vyšlo: prosinec 1983

Počet stran: 269

Počet obrázků: 190

Počet tabulek: 8

AV/A: 24,54/25,35

Vydání: I.

Náklad: 300 výtisků

Číslo knihovny: VŠSE - 362

Tiskárna: Ediční středisko VŠSE v Plzni

Cena: 18,50 Kčs - A

55 - 063 - 83
17/52 Kčs 18,50