
**SAMOREGULACE
JADERNÝCH BLOKŮ S TLAKOVODNÍMI
REAKTORY VYUŽITELNÁ PRO PRIMÁRNÍ
REGULACI FREKVENCE A PŘEDÁVANÉHO
VÝKONU**

Dizertační práce

Autor: Doc. Ing. František Hezoučký
Školitel: Prof. Ing. Josef Kott, DrSc
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba energetických strojů a zařízení

Plzeň 2018

© František Hezoucký

Poděkování

Děkuji svému školiteli prof. Ing. Josefu Kottovi, DrSc za jeho čas, rady a energii, kterou mi během studia a přípravy práce věnoval.

Rád bych vyjádřil poděkování kolegům z ETE, EDU, ČEPS a I&CEnergo za poskytnutí dat týkajících se koeficientů reaktivity a záznamů testů.

Děkuji svým blízkým za podporu a pochopení.

Prohlášení

Předkládám k posouzení dizertační práci zpracovanou na téma „Samoregulace jaderných bloků s tlakovodními reaktory využitelná pro primární regulaci frekvence a předávaného výkonu“.

Práce je koncipována podle požadavků studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předkládanou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí předložené práce.

V Plzni dne

Podpis:.....

ANOTACE

Autor	Doc. Ing. Hezoučský	František
Studijní obor	Stavba energetických strojů a zařízení	
Vedoucí práce	Prof. Ing. Kott, DrSc	Josef
Pracoviště vedoucího práce		
Druh práce	Disertační	
Název práce	SAMOREGULACE JADERNÝCH BLOKŮ S TLAKOVODNÍMI REAKTORY VYUŽITELNÁ PRO PRIMÁRNÍ REGULACI FREKVENCE A PŘEDÁVANÉHO VÝKONU“.	

Fakulta: Fakulta strojní
Katedra : Katedra energetických strojů a zařízení
Rok odevzdání: 2018

Počet stránek : 120

Stručný popis zaměření, cíl, poznatky, přínosy	<p>Práce se zabývá rozbořem jevů, jež se podílejí na samoregulačních procesech u jaderných bloků s tlakovodními reaktory. Aplikace je zmíněna pro VVER 440 a VVER 1000, provozovaných v České republice. Stejný přístup je však možné aplikovat i pro jiné bloky s tlakovodními reaktory, pokud budou známa příslušná projektová data a informace o projektu aktivní zóny.</p> <p>Teoretický rozbor v prvních kapitolách je doplněn diskusí výsledků měření režimů primární regulace provedených na obou blocích ETE po dosažení ukončení energetického spouštění během zkušebního provozu.</p> <p>Měření na obou blocích ETE byla prováděna podle programů 1E048_PR (pro ETE 1) a 2E048_PR (pro ETE 2) s cílem získání certifikátu pro poskytování podpurných služeb v oblasti primární regulace (PPS PR), nikoliv pro detailní studium dějů.</p> <p>Práce prokazuje měnící se samoregulační schopnost jaderných reaktorů v průběhu jednotlivých palivových cyklů.</p> <p>Výsledků práce je možné využít při přípravě nových testů PR tak, aby výsledky byly pro praxi užitečnější.</p>
Klíčová slova	Jaderná elektrárna Dukovany, jaderná elektrárna Temelín, VVER, PWR, samoregulace reaktoru, reaktivita, primární regulace frekvence, bezpečnost

SUMMARY

Author	Hezoučký, Assoc. Prof. Eng.	František
Field of study	Power System Engineering	
Supervisor	Prof. Kott, MSc., PhD., DSc.	Josef
Institution		
Type of work	Dissertation	
Title of the work	SELFCONTROL OF NUCLEAR POWER UNITS WITH PRESSURED WATER REACTORS VALUABLE FOR PRIMARY CONTROL OF FREQUENCY AND POWER	

Faculty: Mechanical Engineering
Department : Power System Engineering
Submitted in: 2018

Pages : 120

Brief description, goal, results and contributions	<p>The presented thesis deals with analysis of phenomenon contribution on self-control processes at nuclear power units with pressurized water reactors. Application is mentioned for units with PWRs of VVER types VVER 440 a VVER 1000, operated in Czech Republic. It is possible to apply such approach also for other units with PWRs, if necessary design information and data of reactor core designs are available.</p> <p>Theoretical analysis mentioned in first chapters is accompanied with discussion of primary control tests realized at both units of nuclear power plant Temelin after completion of power accession tests during testing operation.</p> <p>Measurements at both units were realized according to procedures 1E048_PR (for Unit 1) and 2E048_PR (for Unit 2) , goals of which was to obtain certification for supporting services in area of primary control, not for detailed study of modes.</p> <p>This thesis shows changing capability of nuclear reactors self-control in the course of fuel cycles.</p> <p>It is possible to use the results of this work for preparation of next – new tests of primary control such a way, to make the results more useful for practice.</p>
Key words	Nuclear Power Plant Dukovany, Nuclear Power Plant Temelín, VVER, PWR, reactor self-control, reactivity, primary control of frequency, safety

АННОТАЦИЯ

Автор	Гезоучки, Доц. Инж.	Франтишек
Научная дисциплина	Энергетические установки	
Заведующий работой	Котт, Проф. Инж. Др. наук	Йосеф
Рабочее место заведующего работой		
Вид работы	Диссертация	
Название	САМОРЕГУЛЯЦИЯ ЯДЕРНЫХ БЛОКОВ С ВВЭР РЕАКТОРАМИ ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ДЛЯ ПЕРВЫЧНОЙ РЕГУЛЯЦИИ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ	

Факультет: **Машиностроительный**
Кафедра : **Энергетические установки**
Год передачи: **2018**

Число страниц : **120**

Краткое описание направления, цели, направления, вклады	<p>Этот труд занимается анализом явлений саморегулирующих процессов на ядерных блоках с реакторами ВВЭР. Применение указано у ВВЭР 440 и ВВЭР 1000, эксплуатируемых в Чехии. Аналогичный подход можно применить и для других блоков с водоводяными реакторами, если известны их проектные данные и информация о проекте активной зоны.</p> <p>Теоретический анализ приведённый в первых статьях труда дополнен дискуссией результатов испытаний первичной регуляции проведённых на блоках АЭС Темелин в рамках опытной эксплуатации после энергопуска.</p> <p>Измерения на обоих блоках АЭС Темелин проводились по программам 1E048_PR (для блока 1) и 2E048_PR (для блока 2) с целью получения сертификата для предоставления поддержки в области первичной регуляции и нет для детального изучения процессов.</p> <p>Этот труд показывает как меняется способность саморегуляции ядерных реакторов в течение отдельных топливных циклов. Результаты труда можно использовать при подготовке следующих – новых испытаний первичного регулирования, чтобы результаты были более полезные для практики.</p>
Ключевые слова	АЭС Дукованы, АЭС Темелин, ВВЭР, PWR, саморегуляция реактора, реактивность, первичная регуляция частоты, безопасность.

KURZFASSUNG

Autor	Univ. Doz. Dipl. Ing. Hezoučký	František
Studienfach	Energiemaschinen- und Anlagenbau	
Betreuer	Prof. Dipl. Ing. Kott, DrSc	Josef
Institution		
Art der Arbeit	Dissertation	
Titel	SELBSTREGULIERUNG VON NUKLEAREN BLÖCKEN MIT DRUCKREAKTOREN ZUR PRIMÄREN KONTROLLE VON FREQUENZ UND LEISTUNG	

Fakultät: Maschinenbau
Kathedre: Energieanlagenbau
Abgeben: 2018

Anzahl von Seiten : 120

Kurzbeschreibung	<p>Die Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse der Phänomene, die sich an den Selbstregulierungsprozessen in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren beteiligen. Die Anwendung wird in den in der Tschechischen Republik betriebenen WWER 440 und WWER 1000 Blöcken erwähnt. Der gleiche Ansatz kann jedoch auch an andere Blöcke mit Druckwasserreaktoren angewendet werden, wenn die relevanten Projektdaten und Informationen über das Projekt der Spaltzone bekannt sind.</p> <p>Die theoretische Analyse in den ersten Kapiteln wird durch eine Diskussion der Messergebnisse der Primärregelung ergänzt, die an beiden ETE Blöcken nach der Beendigung der energetischen Inbetriebnahme während des Probetriebes durchgeführt wurden. Die Messungen an beiden Blöcken wurden entsprechend der Inbetriebnahmeprogramme 1E048_PR (für ETE 1) und 2E048_PR (für ETE 2) durchgeführt, um ein Zertifikat für die Bereitstellung von Unterstützungsleistungen in der Primärregelung (PPS PR) zu erhalten, nicht um die Prozesse detailliert zu untersuchen.</p> <p>Die Arbeit erweist das wechselnde Selbstregulierungsvermögen von Kernreaktoren während der einzelnen Brennstoffzyklen. Die Ergebnisse der Arbeit können zur Vorbereitung neuer PR Prüfungen verwendet werden, so dass die Ergebnisse nützlicher für die Praxis werden.</p>
Schlüsselwörter	Kernkraftwerk Dukovany, Kernkraftwerk Temelín, WWER, DWR, Selbstregulierung des Reaktors, Reaktivität, primäre Frequenzregelung, Sicherheit

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	13
Použité zkratky.....	15
1. ÚVOD	18
2. REAKCE JADERNÉHO BLOKU S TLAKOVODNÍM REAKTOREM NA ZMĚNU FREKVENCE V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ	23
2.1 OCENĚNÍ VLIVU SETRVAČNOSTI TURBOGENERÁTORU	28
2.2 OCENĚNÍ VLIVU AKUMULACE TEPLA	30
2.3 OCENĚNÍ VLIVU TEPLOTNÍHO A VÝKONOVÉHO EFEKTU REAKTIVITY REAKTORU	33
2.4 OCENĚNÍ VLIVU TEPELNÉ ROZTAŽNOSTI CHLADIVA PRIMÁRNÍHO OKRUHU NA PRŮBĚH REŽIMU SAMOREGULACE.....	40
2.5 REŽIM REGULACE BLOKU NA KONSTANTNÍ TLAK V HPK	42
3. VLIV REGULACE TURBOGENERÁTORU	48
3.1 HYDRAULICKÁ REGULACE TURBÍNY S HYDRAULICKÝM REGULÁTOREM OTÁČEK	49
3.2 ELEKTRONICKÁ REGULACE TURBÍNY S ELEKTRONICKÝM REGULÁTOREM OTÁČEK.....	54
3.3 TG V REGULACI ELEKTRICKÉHO VÝKONU GENERÁTORU SE ZAPNUTÝM KOREKTOREM FREKVENCE	56
4. REAKTOR V REŽIMU RUČNÍHO OVLÁDÁNÍ, NEBO V REGULACI TLAKU V HPK S ROZŠÍŘENOU NECITLIVOSTÍ.....	60
5. SHRUTÍ KAPITOL 2 až 4	63
6. DISKUSE K VÝSLEDKŮM ZKOUŠEK PRIMÁRNÍ REGULACE ETE.....	65
6.1 ETE 1.....	67
6.1.1 Test primární regulace při simulaci změny otáček TG při výkonu blízkém 100% N_{nom} statika KORf 8%.....	67
6.1.2 Test primární regulace v normálním provozu (NP) při výkonu blízkém 100% N_{nom} , statika KORf 8%	73
6.1.3 Test primární regulace v normálním provozu (NP) při výkonu blízkém 100% N_{nom} , statika KORf 4%.....	77
6.1.4 Test primární regulace v normálním provozu (NP) při výkonu blízkém 80% N_{nom} . Statika KORf 4%	82
6.1.5 Test PR v provozu (NP) při výkonu blízkém 60% N_{nom} , statika KORf 4%	86
6.2 ETE 2.....	89
6.2.1 Měření NP na maximální hladině výkonu, $s=4\%$	89
6.2.2 Test PR imitaci zvýšení otáček TG o ± 5 ot/min na maximální hladině výkonu, $s=4\%$ 91	
6.2.3 Normální provoz na minimální hladině výkonu, $s=4\%$	94

6.2.4	Test PR imitací změny otáček TG o ± 5 ot/min na výkonu okolo 60% N_{nom} , s=4%	95
6.2.5	Test PR při normálním provozu na středním výkonu, s=4%.....	97
6.2.6	Test PR imitací změny otáček TG o ± 5 ot/min na středním výkonu (okolo 80% N_{nom}), s=4%.....	98
6.3	Diskuse výsledků testů.....	101
7.	SOUHRN.....	103
8.	EKONOMICKÁ ÚVAHA.....	105
9.	PŘÍNOS DIZERTACE.....	106
	LITERATURA.....	107
	Příloha 1: Základní projektové parametry I.O. a PG ETE potřebné pro předkládanou studii – původní (projektový) výkon 1000 MW _{el}	109
	PŘÍLOHA 2: Převzato z modifikace C953 – modifikace nastavení RCLS v rámci projektu VPR (B718).....	110
	PŘÍLOHA 3 Změny charakteristik aktivní zóny během vyhořívání 1., 2., a 3. závážky VVER1200.....	115

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.	Název obrázku
1	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav
2	Princip frekvenční odchylky a následné aktivace záloh v kontinentální Evropě
3	Četnost frekvence v ES při nominální $f=50$ Hz
4a	Příklad změn frekvence v čase i derivace změny frekvence – červená čára (max - 0,21Hz/s) – záznam ČEPS
4b	Příklad změn frekvence v čase i derivace změny frekvence – červená čára (max - 0,21Hz/s) – záznam ČEPS
5	Uvolnění a akumulace tepla ve vodě I.O+II.O při lineární změně teploty
6	Závislost kt prvních dvou vsázek ETE na vyhoření
7	Průběh kt ve 12. až 14. cyklu u reaktoru č.1
8	Závislost kt na vyhoření pro cykly 30 až 32 pro bloky 1 až 4 EDU
9	Závislost kt na vyhoření pro 1. zavažku paliva VVER1200
10	Závislost kt na vyhoření pro 2. zavažku paliva VVER1200
11	Závislost kt na vyhoření pro 3. zavažku paliva VVER1200
12	Kompensátor objemu
13	Zapojení KO
14	Závislost základních parametrů VVER 1000 na výkonu v původním projektu ETE
15	ΔN_R [MWt] pro U1 ETE dle vztahu (22), cyklus 12, 13, 14
16	ΔN_R [MWt] pro U1 ETE dle vztahu (23), cyklus 12, 13, 14
17	Závislost elektrického výkonu TG ETE na výkonu reaktoru získaná při uvádění do provozu
18	Charakteristika regulačních ventilů pro turbíny ETE (podle Tp103808-D Škoda Power Doosan)
19	Původní hydraulická regulace turbín ETE
20	Elektronická regulace TG použitá pro EDU (převzato z výkresu V226-30P-6L171)
21	Elektronická regulace TG použitá pro ETE (sdělení Ing. Bica ČEZ ETE)
22	Původní zapojení KORf v EDU
23	Charakteristika korektoru frekvence pro statiku 4 a 8%
24	Změny frekvence v síti (otáček TG) a odpovídající změny výkonu zadaného korektorem frekvence
Diskuse výsledků testů ETE 1	
Test primární regulace při simulaci změny otáček TG při výkonu blízkém 100% N_{nom} , statika KORf 8%, simulované změny otáček TG ± 5 ot/min	
25	ETE 1, test 1. Vzruchy simulací změny otáček

26	ETE 1, test 1. Odezva tlaku v HPK (červená křivka č. 1)
27	ETE 1, test 1 Odezva střední teploty I.O. (křivka č. 8) na změny tlaku v HPK a rozkývání parametrů KO
28	ETE 1, test 1 Odezvy tlaku chladiva v I.O. na změnu střední teploty, funkce vstřiků a EOKO
29	ETE 1, test 1 Neutronový výkon reaguje na změnu střední teploty moderátoru. Samoregulační proces přerušen zasunutím 10.skupiny RO o 1 krok
30	ETE 1, Test 1. Změna elektrického výkonu (detail) v reakci na simulaci zvýšení otáček TG
31	ETE 1, Test 1. Změna elektrického výkonu (detail) v reakci na simulaci snížení otáček TG
Test primární regulace v normálním provozu při výkonu blízkém 100% Nnom, statika KORf 8%.	
32	ETE 1, Test 3. Otáčky TG (3), výstup z KORf (4) a elektrický výkon TG (2),
33	ETE 1 test 3 : tlak v HPK (červená linie) jako výsledek změn elektrického výkonu TG
34	ETE 1, test 3: střední teplota smyčky
35	ETE 1, test 3: Neutronový výkon reaktoru
36	ETE 1 :test 3 Parametry v KO – hladina, tlak, práce regulátoru hladiny a tlaku v KO
37	ETE 1 Otáčky TG (křivka 3) a elektrický výkon generátoru
38	ETE 1 Tlak v HPK (červený)
39	ETE 1 test 3 Neutronový výkon reaktoru
40	ETE 1 test 3 Hladina v KO, střední teplota smyčky a informace o doplňování I.O.
41	ETE 1 test 3 Tlak v KO a práce elektroohříváků a vstřiku do KO
42	ETE 1, test PR, měření č.1, dPKORf
43	ETE 1, test PR, měření č.1, Pskut
Test primární regulace v normálním provozu při výkonu blízkém 80% Nnom, statika KORf 4%.	
44	ETE 1, Odezva výkonu TG na změnu otáček
45	ETE 1, Tlak v HPK (červená křivka)
46	ETE 1, Výkon reaktoru
47	ETE 1, Hladina v KO
48	ETE 1, Tlak v KO
Test primární regulace v normálním provozu při výkonu blízkém 60% Nnom, statika KORf 4%.	
49	ETE 1, Test PR - NP, na minimální hladině výkonu, KORf=4%, dPkor
50	ETE 1, Test PR - NP, na minimální hladině výkonu, KORf=4%, Pskut
51	ETE 1, Průběh elektrického výkonu (černá křivka), tlaku v HPK (modrá křivka) a výstup z CC
52	ETE 1, Hladina v KO jako reakce na změnu střední teploty primárního chladiva

Diskuse výsledků testů ETE 2	
Test primární regulace v normálním provozu při výkonu blízkém 100% Nnom, statika KORf 4%.	
53	ETE 2 Test PR - NP na maximální hladině výkonu, s=4%
54	ETE 2, Test PR - NP na maximální hladině výkonu, s=4%, NRE= 98%
Test primární regulace při simulaci změny otáček TG při výkonu blízkém 100% Nnom, statika KORf 4%, simulované změny otáček TG ± 5 ot/min	
55	ETE 2, Test PR - Δf na maximální hladině výkonu , režim PR, imitace zvýšení otáček o +5 ot/min
56	ETE 2, Test PR - Δf na maximální hladině výkonu , režim PR, ustálený stav
57	ETE 2, Test PR + Δf na maximální hladině výkonu , režim PR, imitace snížení otáček
58	ETE 2, Test PR + Δf na maximální hladině výkonu , ustálený stav
Test primární regulace při normálním provozu na výkonu blízkém 60% Nnom, statika KORf 4%.	
59	ETE 2, Test PR - NP na minimální hladině výkonu (60%) , režim PR
60	ETE 2, Test PR - NP na minimální hladině výkonu (60%) , režim PR
Test primární regulace při simulaci změny otáček TG při výkonu blízkém 60% Nnom, statika KORf 4%, simulované změny otáček TG ± 5 ot/min	
61	ETE 2, Test PR - Δf na minimální hladině výkonu (60%) , režim PR, imitace snížení otáček o 5 ot/min
62	ETE 2, Test PR - Δf na minimální hladině výkonu (60%), s=4%, následný ustálený stav
63	ETE 2, Test PR - Δf na minimální hladině výkonu (60%) , režim PR, imitace zvýšení otáček o 5 ot/min
64	ETE 2, Test PR - Δf na minimální hladině výkonu (60%), s=4%, následný ustálený stav
Test primární regulace v normálním provozu při výkonu blízkém 80% Nnom, statika KORf 4%.	
65	ETE 2, Test PR - NP, střední výkon, výstup z korektoru frekvence
66	ETE 2, Test PR - NP, střední výkon, skutečný elektrický výkon
Test primární regulace při simulaci změny otáček TG při výkonu blízkém 80% Nnom, statika KORf 4%, simulované změny otáček TG ± 5 ot/min	
67	ETE 2, Test PR- Δf na střední hladině výkonu, s=4%, NR=80%, imitace zvýšení otáček
68	ETE 2, Test PR- Δf na střední hladině výkonu, s=4%, NR=80%, ustálený stav
69	ETE 2, Test PR- Δf na střední hladině výkonu, s=4%, NR=80%, imitace snížení otáček
70	ETE 2, Test PR- Δf na střední hladině výkonu, s=4%, NR=80%, ustálený stav

SEZNAM TABULEK

Tab.	
1	Porovnání κ_t několika vsázek a ve třech stupních vyhoření pro ETE
2	Teplotní koeficient reaktivity v závislosti na teplotě prim. chladiva při konstantní koncentraci H_3BO_3
3	Teploty chladiva primárního okruhu pro 3 typy VVER reaktorů
4	Počáteční koncentrace kyseliny borité a počáteční κ_t u tří prvních vsázek VVER 1200
5	Přehled testů PR u ETE 1
6	Přehled testů PR u ETE 2

POUŽITÉ SYMBOLY

p	tlak [Pa], [MPa]
t	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
t_s	teplota sytosti [$^{\circ}\text{C}$]
$\tau = T$	čas [s]
κ_t	samoregulační poměr aktivní zóny (kappa)
ρ	reaktivita [1]
f	frekvence [Hz]
I	moment setrvačnosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
c_p	měrné teplo [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
C_{IO}	tepelná kapacita primárního okruhu [J/K]
C_{celk}	celková tepelná kapacita primárního okruhu spolu s 0konstrukčními prvky, palivem a kotlovou vodou [J/K]
C_{PG}	tepelná kapacita kotlové vody v PG [J/K]
GD^2	setrvačnost rotačního tělesa [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
p_s	tlak sytosti
$t_{\text{l.O.stř}}$	střední teplota chladiva v primárním okruhu
t_H	teplota horké větve I.O.
t_{ch}	teplota chladné studené větve I.O.
t_s	teplota sytosti
MW_{el}	elektrický výkon v MW
MW_t	výkon reaktoru v MW tepelných

Použité zkratky

ATW

AZ aktivní zóna reaktoru

BWR Boiling Water Reactor

ČEPS Česká přenosová soustava

EDU elektrárna Dukovany

EMO elektrárna Mochovce

ENTSO-E: Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny (European Network of Transmission System Operators for Electricity)

EOKO elektroohřívák(y) KO

ES elektrizační soustava

ETE elektrárna Temelín

HDO hromadné dálkové ovládání

HPK hlavní parní kolektor

I.O. primární okruh

II.O. sekundární okruh

KORf korektor frekvence

KO kompenzátor objemu

LS limitační systém

N_t výkon (tepelný)

N_e, N_E výkon elektrický netto, brutto

N_{nom} jmenovitý výkon

NN napajecí nádrž

N_k výkon z kinetické energie, který je uvolňován (či pohlcován) mechanickou setrvačností TG při změnách frekvence

N_R výkon reaktoru

N_R	řízení reaktoru v režimu regulace neutronového výkonu
N_T	řízení turbíny v režimu regulace elektrického výkonu
P_R	řízení reaktoru v režimu regulace tlaku páry v HPK
P_T	řízení turbíny v režimu regulace tlaku páry v HPK

PR, SR, TR primární, sekundární, terciální regulace

P_{skut} výkon bloku skutečný, měřený na svorkách generátoru

P_{zad}	výkon zadaný (do řídicího systému)
PG	parogenerátor
PpS	podpůrné služby
PR	primární regulace
PWR	Pressurized Water Reactor = VVER = tlakovodní reaktor
R1	reaktor 1. bloku
R2	reaktor 2. bloku
RCLS	Reactor Control and Limitation System
RDZ	roční diagram zatížení
RO	regulační orgány
SR	sekundární regulace
TDZ	týdenní diagram zatížení
TG	turbogenerátor
TSO	provozovatel přenosové soustavy (Transmission System Operator)
UCTE	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity = Unie pro koordinaci přenosových soustav
VVER	= PWR = tlakovodní reaktor
Z	zdvih regulačního ventilu

1. ÚVOD

Elektrická práce musí pokrývat společenské požadavky. Bez dodávek elektřiny by nefungovala naše dnešní civilizace. To znamená, že je nutné zajistit stálou a nepřetržitou dodávku elektrické práce podle potřeb odběratelů a umět reagovat na jejich časové změny. Při tom dodávka elektřiny musí splňovat i požadavky na kvalitu, zejména na frekvenci a napětí v síti.

Požadavky na spolehlivou dodávku elektřiny jsou plněny portfoliem elektráren s uvážením charakteristik:

- bezpečnostních (vztah elektrárny vůči okolí),
- spolehlivostních (hodnoty pohotovosti, bezporuchovosti, životnosti, atd.),
- ekonomických (hodnoty účinnosti, resp. měrné spotřeby, nákladovosti apod.),
- technických (statické a dynamické vlastnosti a hodnoty parametrů systémů).

Průběh spotřeby elektrické práce v čase je proměnný z důvodů:

- přírodních cyklů (roční období): roční diagram zatížení (RDZ),
- cyklů společenských aktivit (pracovní a nepracovní doba) ve vazbě na střídání dne a noci: týdenní a denní diagram zatížení (TDZ a DDZ),
- okamžitých společenských aktivit a okamžitého stavu prvků elektrizační soustavy a jejího okolí: průběh zatížení a poruchové stavy (výpadky, resp. náběhy zátěže, zkratky apod.)

Nerovnováha mezi výrobou a spotřebou v elektrizační soustavě (ES) vyvolává změnu frekvence v soustavě. Tak například: přírůstek zatížení se projeví snížením frekvence. Okamžité zvýšení spotřeby se hradí nejprve z pohybové energie roztočených rotorů turbogenerátorů, které jsou zvýšenou spotřebou více brzděny.

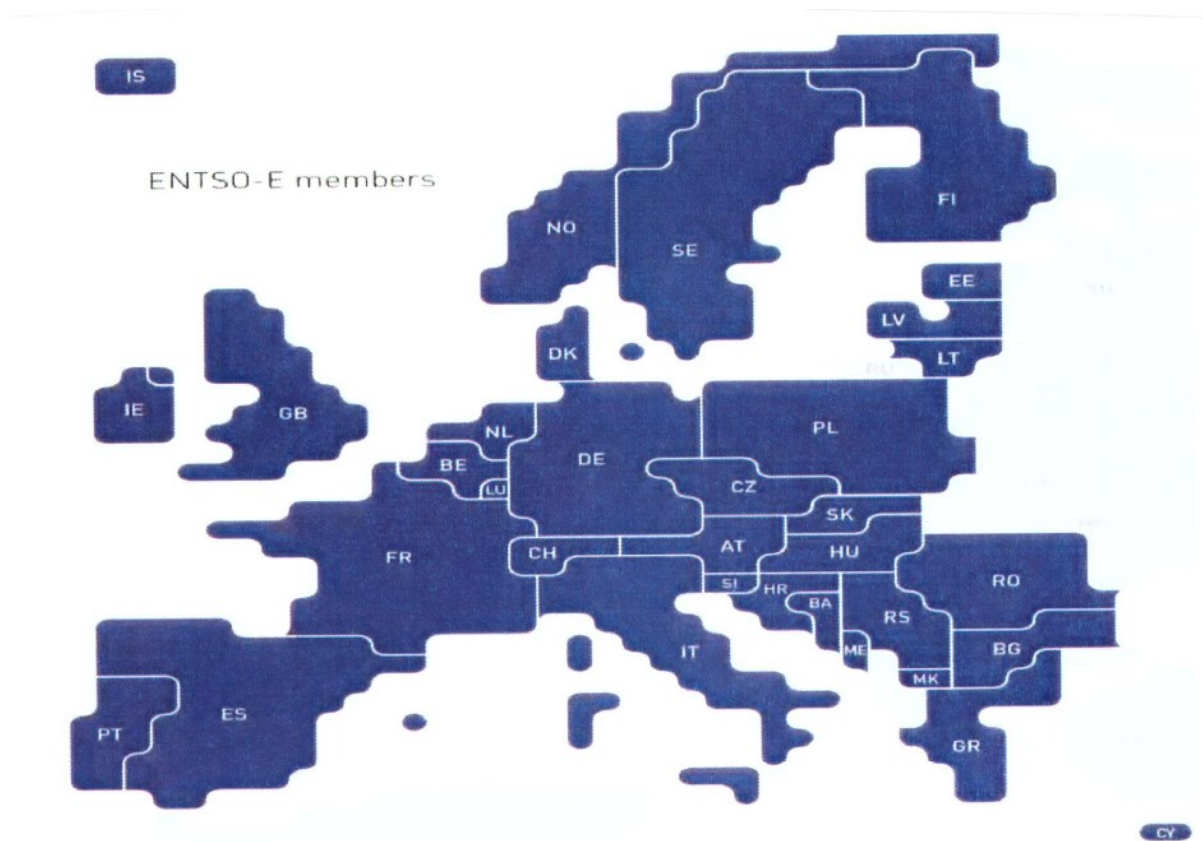
Česká a evropská energetická soustava, jejíž součástí česká energetická soustava je, je ve všech svých subsystémech projektovaná pro provoz při nominální frekvenci $f_n = 50 \text{ s}^{-1}$. Takový provoz zajišťuje, že jednotlivá zařízení (spotřebiče) mají nejvyšší účinnost i plný výkon a provoz soustavy je hospodárný a bezpečný.

Dosahování rovnováhy mezi výrobou a spotřebou je možné změnou výroby (dodávaného výkonu z elektráren), změnou spotřeby (centrálním či individuálním řízením) a kombinací těchto změn.

Změny výroby mohou být plánované - dispečerské řízení a neplánované - poruchy ve výrobě, přenosu, či distribuci. Změny spotřeby, které jsou přirozeným důsledkem chování odběratelů a jejich spotřebičů, lze částečně ovlivňovat a řídit (hromadné dálkové ovládání - HDO), nebo i nepřímé - ovlivňováním pomocí tarifů.

To jsou faktory, které je nutné brát do úvahy.

Český přenosový systém je propojený do jedné evropské sítě energetických soustav.



Obr.1 Evropská síť kooperujících provozovatelů přenosových soustav elektřiny

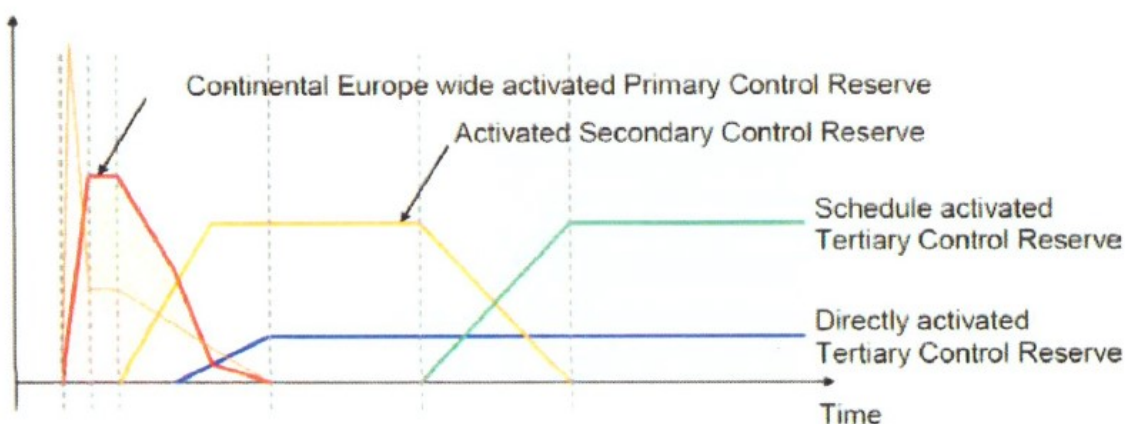
Jedním ze základních prvků řízení synchronně propojených elektroenergetických soustav [21] je koordinace provozu včetně mezinárodních výměn elektřiny a dále řízení okamžité rovnováhy a dodržování plánovaných parametrů. Koordinační mechanismus musí kromě jiného garantovat, že v celém propojeném systému jsou k dispozici dostatečné rezervy pro řízení odchylek, a že zajistit jejich řízení v reálném čase. K tomu byla vytvořena hierarchická struktura koordinačních míst.

V propojeném, hierarchicky strukturovaném systému synchronní oblasti bývalé UCTE definuje řídicí aktivity zajišťující řízení rovnováhy a frekvence (aktivity jsou uvedeny v časové a významové hierarchii pro zajištění rovnováhy, v jaké jsou též vyžadovány, aktivovány a kontrolovány), které jsou jednotlivými systémovými službami:

- primární regulace – sekundová rezerva a aktivita zajišťující společnou akci vedoucí ke stabilizaci nerovnováhy (na principu solidarity všech propojených TSO),
- sekundární regulace – minutová spojitá rezerva zajišťující obnovení vyčerpané rezervy primární regulace a návrat k rovnováze, zajišťované individuálně jednotlivými TSO na principu neintervence,
- terciární regulace – minutová rezerva doplňující vyčerpanou rezervu sekundární regulace a postupně ji nahrazující změnou nasazení výroby zdrojů či spotřeby a zajišťované individuálně jednotlivými TSO podle potřeb jejich soustav,

- řízení času – dlouhodobě vyrovnává odchylky synchronního času jako společná koordinovaná aktivita všech TSO.

Princip solidarity je naplňován primární regulací frekvence, nově frekvenční odezva činného výkonu. V rámci něj jsou v celém systému udržovány na výrobních jednotkách výkonové rezervy a regulační zařízení autonomně reagující na změny frekvence. Velikost je nastavena na současný výpadek dvou největších bloků v celém systému, tj. 3000 MW. Tato rezerva je plně aktivována při odchylce 200 mHz, to znamená, že celková citlivost v rámci primární regulace je 15 000 MW/Hz. Skutečná výše držených rezerv je však obvykle o něco vyšší. Rezerva je rovnoměrně rozdělena po jednotlivých regulačních oblastech, aby nemohlo její aktivací dojít k přetížení linek.



Obr.2 Princip frekvenční odchylky a aktivace výkonových záloh v kontinentální Evropě pro PR, SR, TR v čase

V okamžiku skokové nerovnováhy (výpadku zdroje) v jedné z členských soustav je okamžitě v celém systému aktivována v reakci na pokles frekvence dostatečná výše rezervy, aby byla frekvence stabilizována. Na tomto zásahu se solidárně podílejí regulační rezervy v celém systému proporcionálně. Po její aktivaci je tedy obnovena systémová rovnováha výroby a spotřeby, na kvazistacionární hodnotě frekvence, nicméně část rezervy je vyčerpána a sjednané mezinárodní výměny elektřiny jsou narušeny.

Podpůrnou službu zajišťuje každý z TSO (= v případě České republiky ČEPS) zejména ve své regulační oblasti, kontrahováním od výrobců, kteří ji poskytují.

Podle připravovaného Kodexu, který má platit od roku 2019 bude změněna terminologie služeb:

1. Služby výkonové rovnováhy (SVR)

- Proces automatické regulace frekvence (FCP) – odpovídá současné PR
- Automaticky ovládaný proces obnovené frekvence a výkonové rovnováhy – aFRP – odpovídá SR dle současného kodexu
- Ručně ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy – mFRPt tj. původně TR

- Proces náhrady záloh RRP = nová služba
2. Ostatní služby
 - Snížení výkonu
 - Sekundární regulace U/Q
 - Schopnost startu ze tmy
 - Schopnost ostrovního provozu
 3. Smlouvy na operativní dodávku elektřiny ze zahraničí a do zahraničí
 - Havarijní výpomoc
 - Operativní dodávky do a ze zahraničí

Jaderné elektrárny jsou v zásadě nasazovány jako zdroje základního zatížení z důvodu nízkých variabilních nákladů v žebříčku ostatních dispečersky řízených zdrojů. Tak zněla původně zadání i pro projektanty a konstruktéry, a proto se dlouhou dobu mělo za to, že jaderné zdroje se spotřebě přizpůsobovat neumí. Pro konstruktéry bylo snazší, že nemuseli přemýšlet o únavě materiálů komponent, pro provozovatele je to pohodlnější, neboť lze předvídatelně plánovat odstávky na překládky paliva a údržbu.

Zvyšující se podíl jaderných bloků v soustavě postavil před jadernou energetiku požadavek podílet se na udržování výkonové rovnováhy soustavy na straně zdrojů tzv. primární regulací (PR), sekundární regulací (SR) i terciální (TR) regulací frekvence a předávaného výkonu. Nárůst požadavků na pružné výkonové zálohy vyplývají i z nárůstu proměnlivého výkonu ze zdrojů obnovitelné energie, které mají předností právo k dodávkám do sítě a jaderné bloky budou muset převzít větší zodpovědnost za flexibilitu zdrojů. Podmínkou samozřejmě bude spravedlivá kompenzace za poskytovanou flexibilitu ať už formou podpůrných služeb poskytovaných provozovateli přenosové soustavy, tak i na základě požadavků trhu s elektřinou.

Ještě před spuštěním prvního bloku EDU (1985), v červnu 1982, byl vydán vnitroelektrárenský dokument "Příspěvek k možnosti využití JE s bloky VVER - 440 v režimu regulace frekvence a předávaného výkonu" [1]. Ten pak posloužil při přípravě dukovanských bloků pro popisovaný režim.

Pro temelínské bloky s VVER 1000 byl sice v digitální formě dodán regulační systém, jehož projekt již odpovídá představám moderního regulačního systému TG i reaktoru, avšak fyzika aktivní zóny a termodynamika soustavy zůstává. Analýza schopnosti konkrétní aktivní zóny VVER 1000 je popsána v článku „K možnosti využití JE s bloky VVER - 1000 v režimu regulace frekvence a předávaného výkonu“ uveřejněného v Bezpečnosti jaderné energie 1-2 / 2014. [2] .

Jaderné bloky byly celkem úspěšně testovány v režimech proměnlivého zatížení u nás i v mnoha některých evropských zemích. V proměnlivém zatížení byly provozovány zejména ve Francii a v Německu. Pro proměnlivé zatížení je nutné, aby některé části

komponent byly už pro tento účel navrženy, neboť v nich dochází k častým změnám teploty a tím k nízkocyklické únavě materiálu.

Ochota provozovat jaderné bloky v proměnlivém zatížení závisí v mnohém na ceně podpůrných služeb i předvídatelnosti jejich potřeb z důvodu plánování. V současné době je o takové služby proměnlivý zájem, mj. i proto, že takové služby jednak nejsou úměrně honorovány, jednak je na trhu přetlak nabídky primární regulace od jiných (nejaderných) zdrojů. Budou-li však v následujících létech odstavovány uhelné elektrárny a stavěny další jaderné bloky a jejich podíl na výrobě se zvětší, bude nutné znovu uvažovat o jejich zapojení i do primární regulace.

Tato práce navazuje na [1] a [2] a hodlá se hlouběji věnovat procesům, které provázejí změny výkonu bloků s tlakovodními reaktory, a možností jejich podílu na primární regulaci (PR). Nezabývá se otázkami nasazování výkonů pro sekundární (SR) a terciální regulaci (TR), které jsou popsány např. v [4].

Minulé práce [1], [2], zpracované k otázkám samoregulačních vlastností byly věnovány pouze otázkám zpětnovazebních jaderných procesů tlakovodního reaktoru. Při bližším studiu však nelze zanedbat i jevy nejaderného charakteru. Jde jednak o setrvačnost turbosoustrojí, ale i obrovské množství naakumulovaného tepla ve velkém objemu primárního okruhu, v kotlové vodě v parogenerátorech, ale i o teplo akumulované v materiálu zařízení.

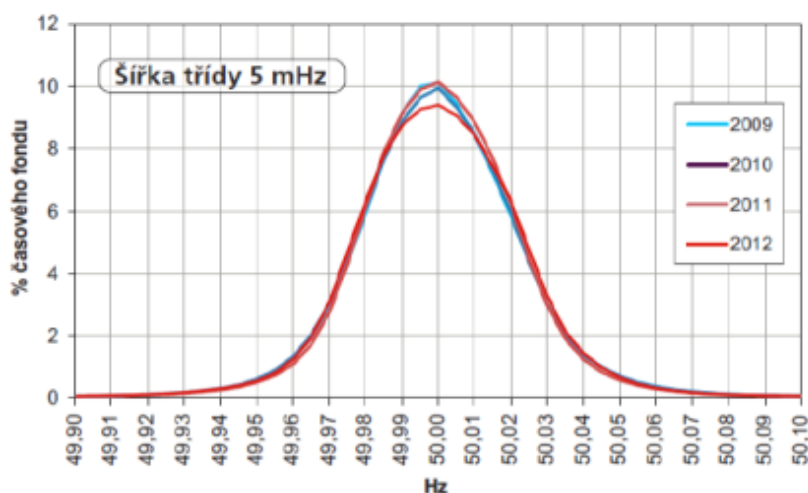
3. REAKCE JADERNÉHO BLOKU S TLAKOVODNÍM REAKTOREM NA ZMĚNU FREKVENCE V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ

Na obr. 3 je rozdělení četnosti frekvence v energetické soustavě v období čtyř let (za léta 2009 až 2012). S různou četností dochází k odchylkám od nominální frekvence 50 Hz. Malé stochastické změny zatížení elektrizační soustavy lze měřit (viz obr.4a, 4b), a pozorovat v každé elektrárně, v závislosti na provozním režimu regulátorů TG: Vždy je to patrné na malých změnách otáček generátorů sledujících frekvenci sítě, na pohybu regulačních ventilů turbíny a i na změnách elektrického zatížení alternátoru.

U jaderných bloků s tlakovodními reaktory se tyto malé a rychlé stochastické změny mohou odehrávat,

Obr. 3 Četnost frekvence v ES při nominální $f=50$ Hz

aniž by muselo docházet ke změnám tepelného výkonu reaktoru – jednak díky obrovské setrvačnosti točícího se turbosoustrojí, dále díky akumulaci tepla jeho uvolňováním anebo pohlcováním. Teprve při větších, resp. dlouhodobějších změnách dojde na změnu tepelného výkonu reaktoru vlivem



změn reaktivity vyvolaných změnou teploty moderátoru. Vliv akumulace tepla se uplatňuje zejména u bloků s reaktory VVER charakterizovaných velkým objemem chladiva v primárním okruhu i kotlové vody v PG. Proces probíhá v zásadě v následovné sekvenci:

Přírůstek zatížení v ES (ztráta zdroje, zapnutí velkého spotřebiče) vyvolá snížení frekvence v ES. Snížení frekvence na jaderném bloku způsobí

1. v prvních okamžicích snahu o udržení frekvence setrvačností TG (momentem setrvačnosti $\approx GD^2$). Rotor TG je sítí brzděn (rozdílem výkon-příkon).
2. snahu hydraulického regulátoru otáček (u bloků, kde ještě nebyla hydraulická regulace nahrazena elektronickou) udržet otáčky TG zvýšeným odběrem páry (TG v režimu ručního ovládní, nebo i v režimu regulace elektrického výkonu se zapnutým korektorem frekvence). Zvýšeným odběrem páry dojde ke snížení tlaku v parogenerátorech (PG), ke zvýšení odparu a okamžitým čerpání naakumulovaného tepla v kotlové vodě

na sekundární straně PG a následně i čerpání naakumulované energie z primárního okruhu,

3. v další fázi, dojde snížením teploty chladiva primárního okruhu k uvolnění teplotního efektu reaktivity jaderného paliva a nárůstu výkonu reaktoru následovaném zpomalením nárůstu a stabilizací výkonu vlivem výkonového efektu reaktivity.

Opačný proces - při snížení zatížení v ES (vypnutí velkého spotřebiče, nebo skupiny spotřebičů), nebo snížení napětí díky - třeba i vzdálenému – zkratu, vyvolá zvýšení frekvence v energetické soustavě. Reakce jaderného bloku bude následující:

1. v prvních okamžicích bude točící se TG urychlován sítí (rozdílem příkon-výkon) a bude se setrvačností bránit urychlení
2. otáčkový regulátor (u bloků s hydraulickým regulátorem otáček) bude přivírat přívod páry do turbíny (TG v ručním ovládní, nebo v režimu regulace elektrického výkonu se zapnutým korektorem frekvence). To způsobí nárůst tlaku v PG, snížení odparu a akumulaci tepla v kotlové vodě a následně i v chladivu primárního okruhu.
3. nárůst teploty chladiva primáru způsobí potlačení výkonu vlivem teplotního efektu reaktivity a jeho stabilizaci na jiné výkonové hladině díky výkonovému efektu reaktivity.

Kromě efektu setrvačnosti turbogenerátoru se uplatní i role tření v ložiscích TG a ventilačních ztrát, jejichž vliv se mění s třetí mocninou otáček. Znamená to, že při snížení frekvence v síti je rotor TG méně brzděn, takže je více energie využíváno pro výrobu elektrické práce – a při zvýšení frekvence v síti naopak. Tyto efekty jsou však relativně malé a lze je pro účely této práce zanedbat. Tak například při poklesu frekvence z 50 na 49,98 Hz se změní vliv těchto ztrát o 0,12%.

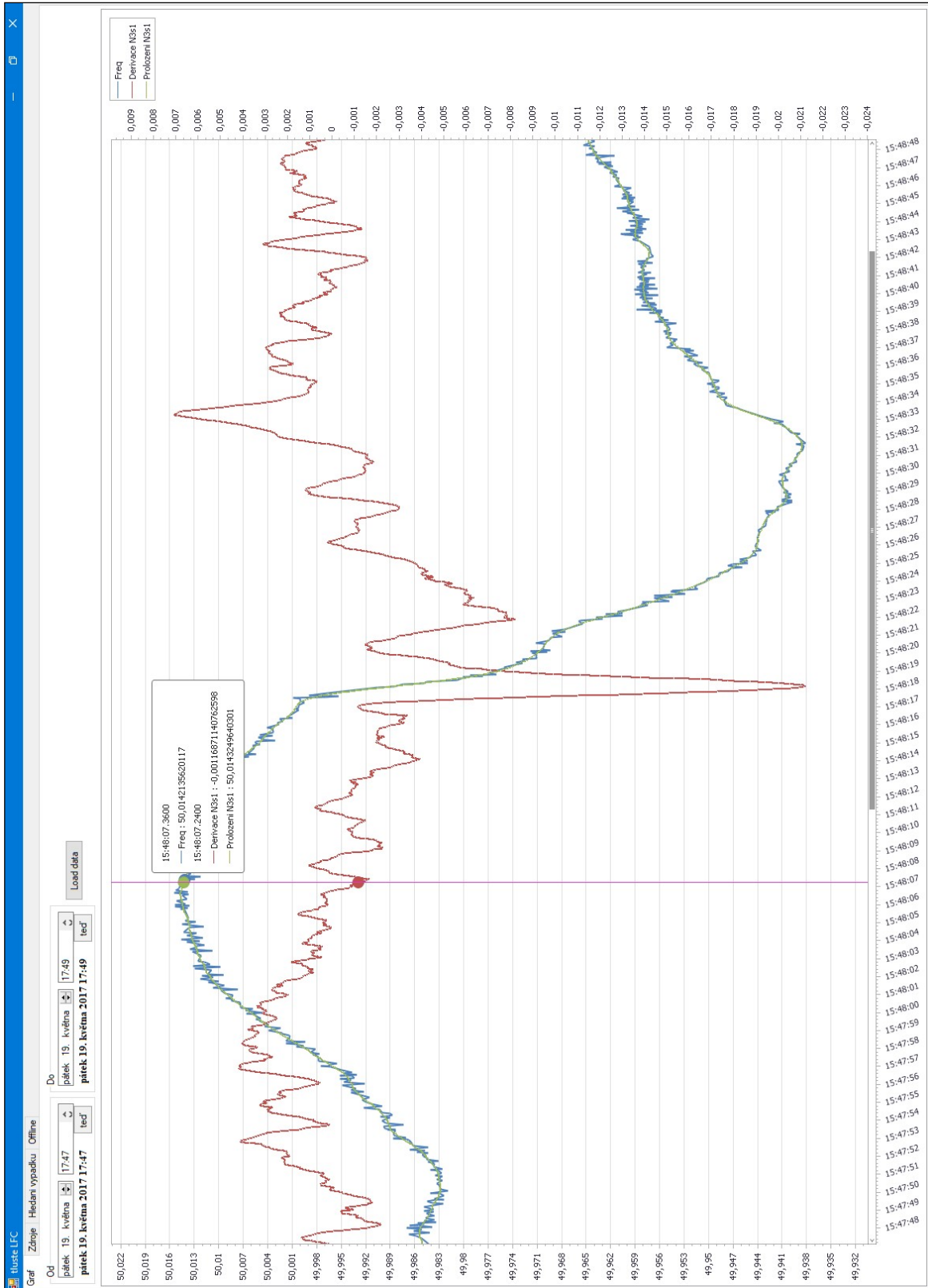
O něco větší, krátkodobý, efekt, který však působí proti samoregulačním jevům, je váhový obsah páry v turbíně. Při zvýšení frekvence v síti, kdy dochází k přivření regulačních ventilů, zůstává v turbíně ještě chvíli původní váhový obsah páry, který při expanzi zpomaluje snižování výkonu TG. Obdobně při snížení frekvence a potřebě zvýšení průtoku páry turbínou je v prvním okamžiku potřebné doplnit páru v turbíně a se zvýšením výkonu počítat s určitým zpožděním. Velikost tohoto efektu, je však proti jiným vlivům rovněž malá.

Kromě efektu setrvačnosti turbogenerátoru se uplatní i role tření v ložiscích TG a ventilačních ztrát, jejichž vliv se mění s třetí mocninou otáček. Znamená to, že při snížení frekvence v síti je rotor TG méně brzděn, takže je více energie využíváno pro výrobu elektrické práce – a při zvýšení frekvence v síti naopak. Tyto efekty jsou však relativně

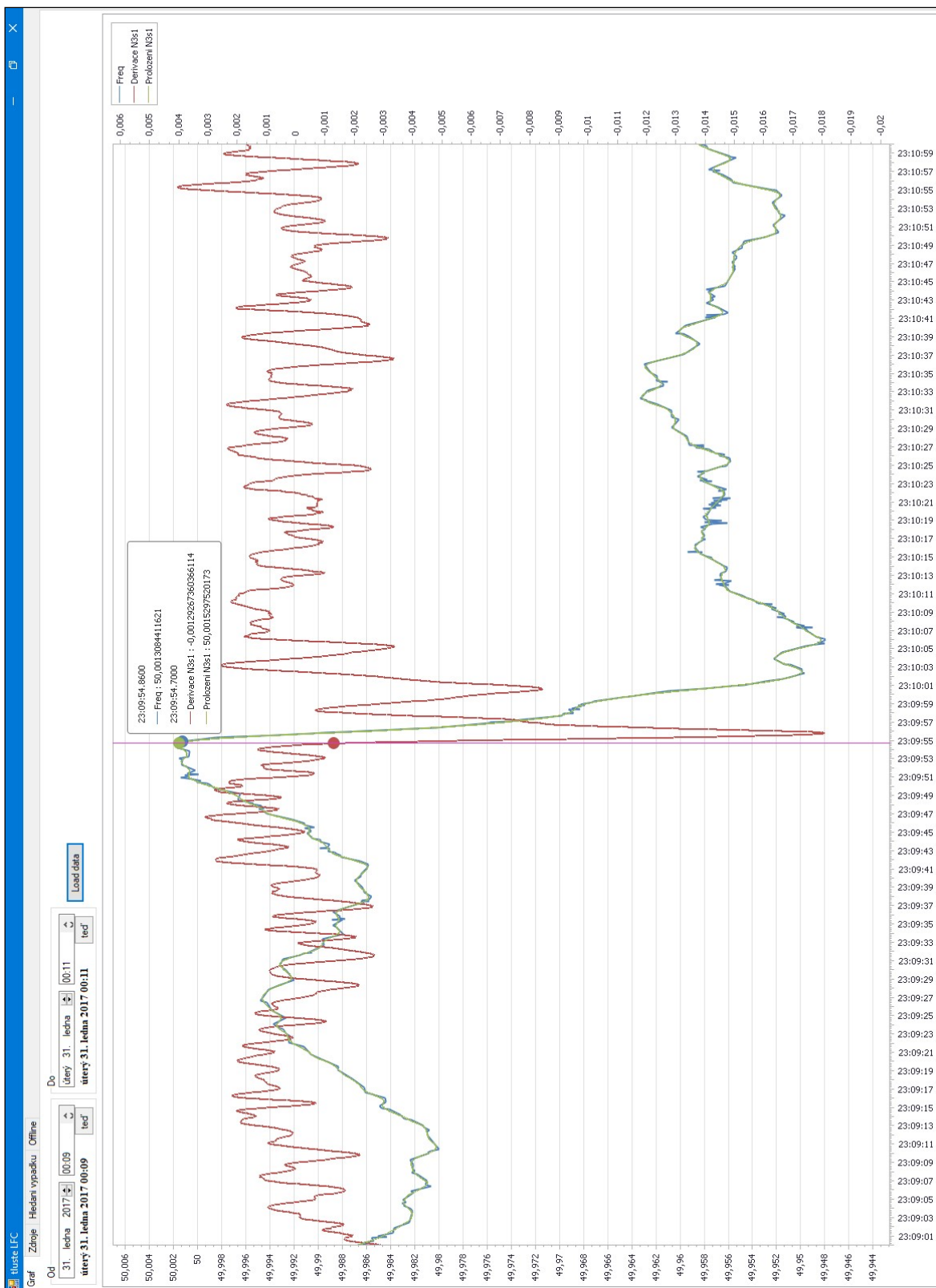
malé a lze je pro účely této práce zanedbat. Tak například při poklesu frekvence z 50 na 49,98 Hz se změní vliv těchto ztrát o 0,12%.

Největší změny frekvence v ES se odehrávají po výpadcích velkých bloků (zejména 1300 MW bloky francouzských JE). Výpadek větší než 1300 MW nebyl již po delší dobu zaznamenán. Podle informace z ČEPS by měl evropský systém bez problémů zvládat výpadek až do 3000 MW.

Obr. 4a Příklad změn frekvence v čase i derivate změny frekvence – červená čára (max. -0,21Hz/s) – zdroj ČEPS



Obr. 4 b Příklad změn frekvence v čase i derivace změny frekvence –červená čára (max -0,21Hz/s)– zdroj ČEPS



3.1 OCENĚNÍ VLIVU SETRVAČNOSTI TURBOGENERÁTORU

Kinetická energie rotoru TG je

$$E_k = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 = I \cdot 2 \cdot (\pi \cdot f)^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{J}] \quad (1)$$

kde „I“ je moment setrvačnosti turbogenerátoru.

Časová změna frekvence $\frac{df}{dt}$ způsobí změnu kinetické energie

$$\frac{dE_k}{dt} = 4 \cdot I \cdot \pi^2 f \cdot \frac{df}{dt} = N_k \text{ [W]} \quad (2)$$

kde N_k je výkon, který je uvolňován (či pohlcován) setrvačností TG při změnách frekvence. Malé rychlé změny frekvence sítě v obou směrech (\pm) budou v první řadě korigovány kinetickou energií TG prakticky okamžitě, aniž by nutně muselo dojít ke změnám teploty kotlové vody a čerpání naakumulovaného tepla.

Podle informace ze ŠKODA Power - Doosan:

- TG EDU (220 MW) $I=30239 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ($GD^2=120957 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)
- TG ETE (1000 MW) $I=87597 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ($GD^2=350388 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$) – pro původní rotory s nimiž byly prováděny testy. Po úpravě rotoru turbíny je v současné době $I=126648 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Pozn.: $GD^2=4 \cdot I$

Příspěvek k výkonu vlivem setrvačnosti soustrojí bude pro TG ETE $N_k = 175 \cdot \frac{df}{dt}$ [MW] a pro každý z TG EDU bude $N_k = 60.4 \cdot \frac{df}{dt}$ [MW]

Při velkých změnách frekvence zaznamenané na obr. č. 4a - 0,21Hz/s bude krátkodobý příspěvek TG ETE jen ze setrvačnosti turbosoustrojí +37MWel. Při $df/dt = \pm 0,1 \text{ Hz/sec}$, bude příspěvek „jen“ $\pm 17,5 \text{ MWel}$ pro TG ETE resp. $\pm 6 \text{ MWel}$ pro každý z TG EDU. Z grafu odchylek kmitočtu od nominální hodnoty 50 Hz (obr. č. 4a, b) je patrné, že za velkou rychlost odchylky je možné považovat dokonce $df/dt = \pm 0,03 \text{ Hz/s}$, takže příspěvek bude $\pm 5,2 \text{ MW}$, pro ETE resp. 1.8 MW pro každý z turboalternátorů EDU. Pro regulaci primární frekvence jde tedy o příspěvek setrvačnosti TG relativně malý.

Do malých a rychlých fluktuací frekvence, kterých je během dne (i mimo špiček) mnoho, však GD^2 zasahuje trvale menším příspěvkem – ovšem vždy pouze během změny frekvence – kdy

$$\frac{df}{d\tau} \neq 0. \quad (3)$$

Vliv setrvačnosti TG je patrný při ustáleném provozu TG v režimu ručního ovládní, v režimu regulace elektrického výkonu s i bez korektoru frekvence, ale i v režimu regulace TG na konstantní tlak v HPK, kdy jsou vidět změny elektrického zatížení jako následek fluktuace frekvence. Při takové fluktuaci lze očekávat změny výkonu většinou v mezích $\pm 2\text{MWel}$. Záznamy z měření tuto skutečnost dokazují, jak je ukázáno v kapitole 6.

3.2 OCENĚNÍ VLIVU AKUMULACE TEPLA

Tepelnou kapacitu I.O. můžeme vyjádřit „vodním číslem“ vodní náplně a konstrukcí komponent. Pro získání představy uvažujme VVER 1000.

- Konstrukce tvoří 3794 t oceli, což odpovídá zhruba 322 t vody, (c_p vody při 290°C je cca 5300 J/kg·K, c_p železa 450 J/kg·K).
- Hmotnost vody v I.O při nominální hladině v KO je 270 t, bez KO je to 240 t.
- Tepelná kapacita 120 t paliva při měrném teple uranu $c_p = 235,5$ J/kg·K je úměrná 5,33 t vody
- Hmotnost kotlové vody na sekundární straně PG je $4 \times 78 = 312$ t.

Celkové vodní číslo vody primáru, kotlové vody a paliva (je zcela omývané chladičem primáru) pro výpočetní úvahy je tedy $240 + 5,33 + 312 = 557,33$ t. Toto vodní číslo odpovídá tepelné kapacitě $C_v = 2953,85$ MWs/K = 0.82 MWh/K .

Spolu s konstrukčními materiály bude vodní číslo o 322 t větší, tj. 880 t. Toto vodní číslo odpovídá tepelné kapacitě $C_{celk} = 4660$ MWs/K = 1,29 MWh/K

Poznámka:

Výsledky horkých zkoušek ETE vykazují hodnotu tepelné kapacity $C_{celk} = 1,17$ [MWh/K] ale bez paliva, které bylo při horkých zkouškách v aktivní zóně nahrazeno imitátory palivových souborů.

Tepelný výkon uvolňovaný (nebo pohlcovaný) tepelnou kapacitou C bude proporcionalní rychlosti změny teploty

$$N_c = -C \times \frac{\partial t}{\partial \tau} \text{ [MW]} \quad (4)$$

Při rychlejších změnách, kdy se neuplatní teplo naakumulované v konstrukčních materiálech, bude

$$N_c = -C_v \times \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (5)$$

Při změnách pomalejších, kdy se se zpožděním bude moci uplatnit i teplo naakumulované v konstrukčních materiálech, bude

$$N_c = -C_{celk} \times \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (6)$$

V PG je produkována sytá pára. Základním režimem provozu většiny bloků VVER (i českých a slovenských) je provoz na konstantní tlak v hlavním parním kolektoru (HPK) v celém rozsahu výkonů. To neplatí pro ETE, kde před spouštěním byl zrealizován digitální systém řízení a nyní jsou využívány K-křivky (viz příloha2).

Teplota varu kotlové vody t_s a příslušného tlaku sytosti p_s budou však svými stavovými veličinami určovat i parametry chladiča primárního okruhu. Jak je známo, bude

teplota primárního okruhu při nulovém výkonu odpovídá teplotě sytosti na sekundární straně PG t_s při odpovídajícím tlaku p_s . Teplota t_s je funkcí p_s a proto můžeme napsat

$$N_c = -C_v \times \frac{\partial t}{\partial \tau} \times \frac{\partial p_s}{\partial p_s} \cong -C_v \times \frac{\partial t_s}{\partial p_s} \times \frac{\partial p_s}{\partial \tau} \quad (7)$$

kde $\frac{\partial t_s}{\partial p_s}$ je pouze vlastností páry na mezi sytosti a pro nominální tlak v PG $\sim 6,3$ MPa se rovná 11,21 K/MPa

Příklad:

Naakumulovaná energie je při snížení tlaku páry v PG např. o 0,1 MPa (během 10 sekund) (= 0.01 MPa/s) nejdříve uvolněna z kotlové vody, pak z chladiva I.O. a z akumulace v palivu a posléze z konstrukcí.

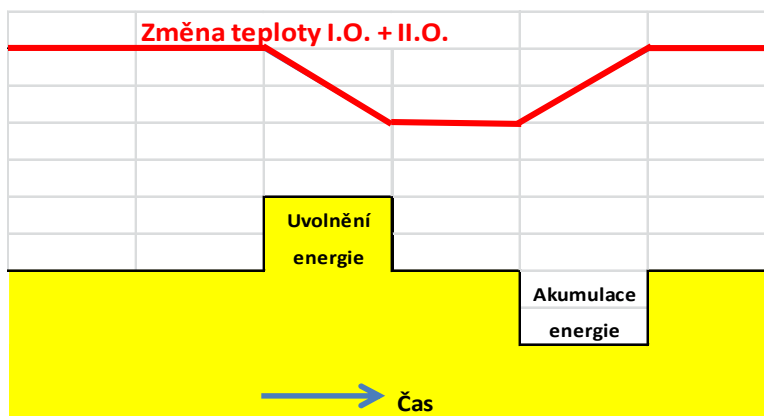
Postupné (krátkodobé) uvolňování po dobu změny teploty by bylo:

- Z kotlové vody na sekundární straně PG:
 $312 \cdot 10^3 \cdot 5,3 \cdot 10^3 \cdot 11,21 = 18530 \text{ [MWs/MPa]} \cdot 0,01 \text{ MPa/s} = 185 \text{ MWt}$.
 Tomu by odpovídal elektrický výkon cca $\leq 61 \text{ MWe}$ na dobu 10 sekund.
- Z cirkulujícího moderátoru a jaderného paliva by se při delším čase mohlo uvolnit dalších $\leq 145 \text{ MWt}$, – se zpožděním - v podstatě až po ochlazení kotlové vody na novou stabilizovanou teplotu - dalších cca $\leq 48 \text{ MWe}$.

Pro relativně rychlé cyklické změny při primární regulaci lze zanedbat akumulaci v konstrukcích a samozřejmě, že se při rychlých cyklických změnách neuvolní celý výše uvedený výkon.

Uvolněný, resp. akumulovaný (krátkodobý) výkon bude tím větší, čím rychlejší bude změna tlaku v PG a bude se samozřejmě odehrávat jen po dobu změny tlaku. Po ustálení tlaku páry ($\partial p_s / \partial \tau = 0$) příspěvek akumulace končí.

Obr. 5 Uvolnění a akumulace tepla ve vodě I.O.+II.O při lineární změně teploty



Uvolněná či akumulovaná tepelná práce bude úměrná změně teploty I.O+II.O., která se začne měnit v závislosti na změně tlaku v PG $\pm \Delta p_s$. Pro stejnou změnu teploty bude tepelná práce integrálně v čase stejná pro libovolně rychlé změny teploty a tlaku:

$$W = \int N_c(t).d\tau \cong -C_v \frac{\partial t_s}{\partial p_s} \cdot \Delta p_s = 0,82 \text{ MWh/K} \cdot 11,21 \text{ K/MPa} \cdot \Delta p_s = 9,192 \text{ MWh/MPa} \cdot \Delta p_s \quad (8)$$

Pro výše uvedený příklad bloku s VVER 1000 se při $\Delta p_s = -0,1 \text{ MPa}$ se celkově uvolní tepelná práce až $0,92 \text{ MWh} = 3312 \text{ MWs}$ nezávisle na tom, jak rychle se naakumulované teplo uvolní. Uvolněná / pohlcená práce poskytne rovněž čas ke změnám neutronového výkonu reaktoru, neboť teplota primárního chladiva se bude měnit se zpožděním za teplotou kotlové vody.

3.3 OCENĚNÍ VLIVU TEPLOTNÍHO A VÝKONOVÉHO EFEKTU REAKTIVITY REAKTORU

Samoregulační vlastnosti reaktoru jsou dány teplotním a výkonovým efektem reaktivity, jejich součet musí být (pomineme-li v prvních úvahách dlouhodobější vlivy - vyhořívání paliva, změny koncentrace H_3BO_3 v chladivu I.O.- a tepelnou setrvačnost soustavy) v každém okamžiku nulový:

$$(\partial\rho/\partial t_{I.O.}).dt_{I.O.} + (\partial\rho/\partial N_R).dN_R = 0 \quad (9)$$

kde $\bar{t}_{I.O.}$ je střední teplota chladiva v AZ (střední teplota moderátoru),
 ρ reaktivita
 $\partial\rho/\partial t_{I.O.}$ parciální derivace reaktivity podle teploty (teplotní koeficient)
 $\partial\rho/\partial N_R$ parciální derivace reaktivity podle výkonu (výkonový koeficient)
 N_R výkon reaktoru

a tedy

$$-\frac{dN_R}{d\bar{t}_{I.O.}} = \frac{\frac{\partial\rho}{\partial t}}{\frac{\partial\rho}{\partial N}} \quad [MWt/K] \quad (10)$$

Označme poměr teplotního a výkonového koeficientu „kappa“ - κ_t (nebo κ_t)

$$\frac{\frac{\partial\rho_t}{\partial t}}{\frac{\partial\rho_N}{\partial N}} = \kappa_t = \kappa_t \quad [MWt/K] \quad (11)$$

Teplotní a výkonový koeficient je k dispozici pro každý projekt AZ a ověřuje se v rámci fyzikálních testů. Hodnotu κ_t lze tedy vyčíslit pro průběh celého cyklu.

Na následujícím grafu (obr.6) je průběh κ_t pro první dvě vsázky AZ (hodnoty tepelného a výkonového koeficientu reaktivity jsou vzaty z neutronově fyzikálních charakteristik ETE).

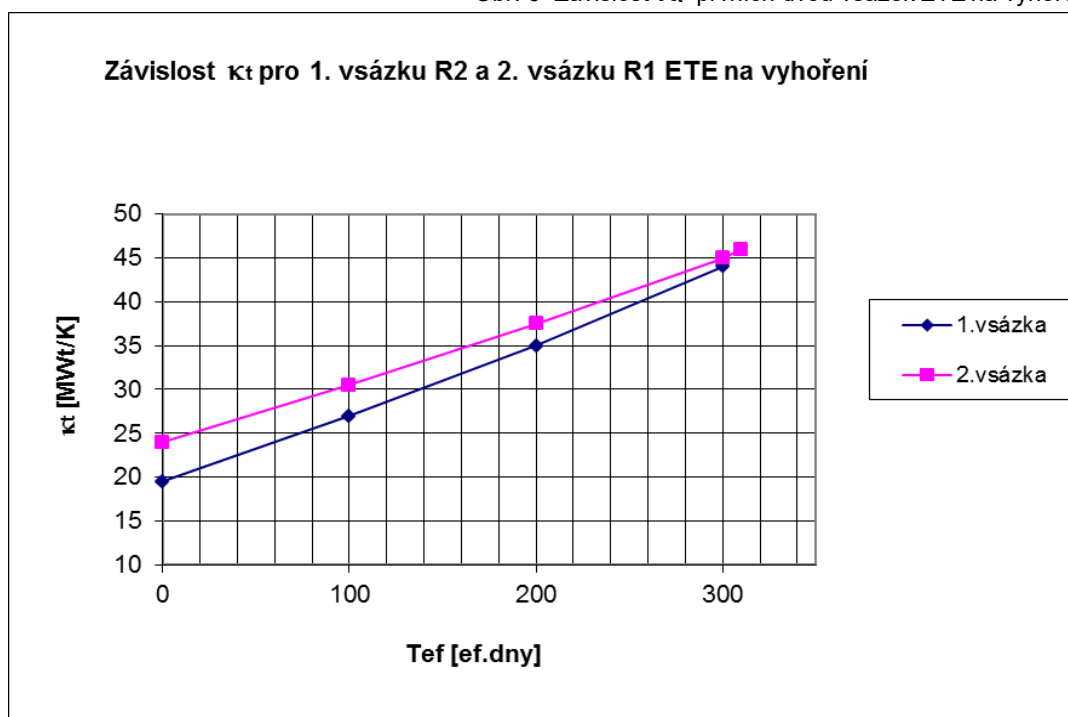
Z obrázku č.6 je patrné, že 1. vsázka skýtá o něco menší možnosti využití samoregulačních vlastností, a že se samoregulační vlastnosti u obou závážek podstatně

mění během kampaně.

Budeme-li tedy u 1. vsázky předpokládat možnost změny střední teploty I. a II.O. o ∓ 1 K, bude reaktor schopen, díky samoregulaci, měnit v (první fázi přechodového procesu) výkon o ± 20 MWt/K na počátku cyklu a o ± 44 MWt/K na konci palivového cyklu.

U 2. vsázky bude při změně střední teploty I. a II.O. o 1 stupeň, reaktor schopen měnit v výkon o ± 24 MWt/K na počátku a o ± 46 MWt/K na konci palivového cyklu.

Obr. 6 Závislost χ_t prvních dvou vsázek ETE na vyhoření



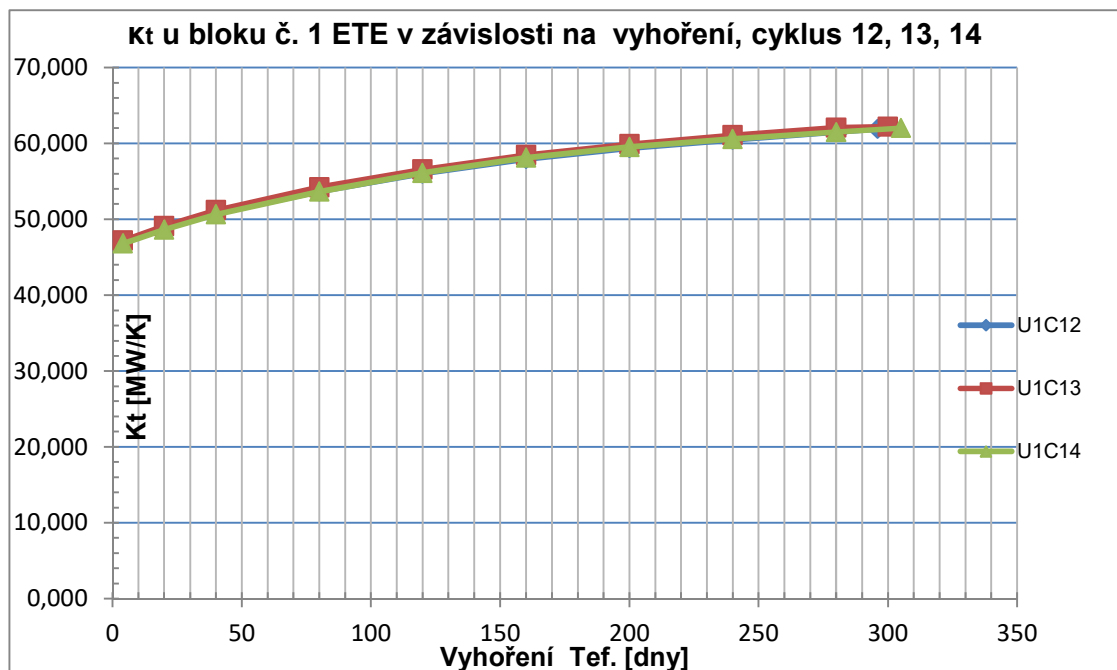
Pro cyklus 12, 13, 14 (viz obr. 7 i následující tabulku č.1) jsou hodnoty χ_t reaktoru 1.bloku ETE na úrovni, které skýtají šanci velmi dobrého využívání samoregulačních vlastností reaktoru pro primární regulaci.

Tabulka č.1 Porovnání χ_t u několika vsázek a ve třech stupních vyhoření pro ETE

Vyhoření vsázky [ef. dny]	χ_t [MWt / K]				
	1.vsázka	2.vsázka	12.vsázka	13.vsázka	14.vsázka
0	20	24	47,1	47,2	46,8
160	32	34	57,93	58,4	58,1
300	44	46	61,9	62,2	62,0

Z tab. č. 1 a následujícího obrázku č. 7 je patrné, že při pouhých změnách střední teploty primárního okruhu o $\pm 1\text{K}$ jsou možné změny tepelného výkonu reaktoru o $\pm 47\text{ MWt}$ na počátku cyklu až 62 MWt před odstavením na překládku paliva pro další cyklus. Tomu odpovídá změna elektrického výkonu $\pm 15,7$ až $20,7\text{ MWe}$ při změně teploty I.O. o 1K .

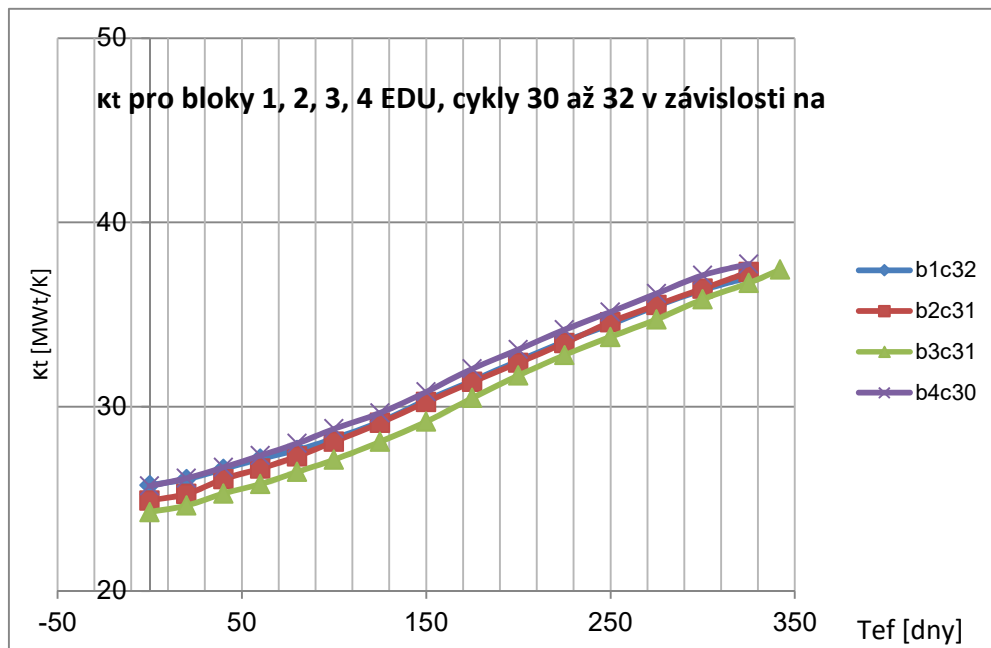
Obr. 7 Průběh κ_t ve 12. až 14. cyklu u reaktoru č.1



Srovnatelné hodnoty s 2. vsázkou (2.cyklu) ETE mají aktivní zóny reaktorů EDU ve 30. až 32. cyklu (obr. 8) [10], jen vývoj v závislosti na vyhoření je pozvolnější. Všechny bloky EDU jsou dnes provozovány v pětileté kampani s palivy Gd-2M (tabletky s centrálním otvorem) a Gd-2M+ (tabletky bez centrálního otvoru), oboje s obohacením 4,38%.

Závislost κ_t pro pozdější cykly na ETE ukazuje, že cykly 12, 13, 14 jsou z hlediska κ_t takřka totožné a jsou větší než u prvních dvou cyklů. Začínají na hodnotě $\Delta N_R = 47\text{ MWt/K}$ a končí na hodnotě cca 62 MWt/K , tj. 1,5 až 2% N_{Rnom} . Tomu odpovídá možnost změny elektrického výkonu 1,92 až 2,32 % N_{TGnom} tj. 20 až 24 MWe při změně střední teploty primárního okruhu o 1K .

Obr. 8 Závislost κ_t na vyhoření pro cykly 30 až 32 pro bloky 1 až 4 EDU



Důvody pro velikost κ_t i mírně konkávní charakter závislosti je třeba hledat v charakteru aktivní zóny. Zatímco první vsázky byly „velkoučnikové“, s umístěním čerstvého obohaceného paliva v periferní oblasti aktivní zóny (AZ), současné závázky mají strategii „nízkoučnikovou“ při níž se čerstvé palivo zaváže do centra AZ a částečně vyhořelé palivo se přesouvá na periferii.

Jiný charakter průběhu κ_t je v současnosti na EDU. Jednak je nikoli konkávní ale hlavně je menší než na ETE. Pro účely režimu samoregulace ve prospěch regulace frekvence jsou bloky VVER440 méně vhodné. V zásadě by je bylo možné pro tyto účely využívat při požadavku na změny $\pm 10\text{MWel}$ až ve druhé polovině palivového cyklu.

Pro naše jaderné elektrárny není v současnosti aktuální, ale bezpochyby zajímavý, průběh κ_t pro první blok VVER 1200 (viz obr. 9 až 11). Jednak proto, že hodnota κ_t je už na počátku první závázky poměrně vysoká, ale ke konci prvního cyklu dosahuje téměř hodnoty $100\text{MWt/K} \sim 8,3\%$ nominálního tepelného výkonu reaktoru při změně střední teploty primárního chladiva o 1 K.

Porovnáním hodnot $\partial\rho/\partial t$ a $\partial\rho/\partial N$ u VVER 440, VVER 1000 a VVER1200 zjistíme, že zatímco výkonový koeficient reaktivity se během vyhořívání mění poměrně málo, teplotní koeficient reaktivity je (v absolutní hodnotě) tím větší, čím větší je střední teplota primárního chladiva a čím nižší je v něm koncentrace kyseliny borité (H_3BO_3). Zatímco průběh poklesu koncentrace H_3BO_3 je během cyklu u všech reaktorů zhruba stejný (cca od 6g/kg do $0\text{g H}_3\text{BO}_3/\text{kg H}_2\text{O}$), pracovní nominální střední teplota chladiva se liší, jak ukazuje následující tabulka tab. 3.

Vliv střední teploty chladiva primárního okruhu na teplotní koeficient reaktivity je možné zjistit i při fyzikálních měřeních $\partial\rho/\partial t$ při různých teplotách chladiva, pro konstantní koncentraci kyseliny borité. Tak např. pro reaktory VVER 440 byly v EDU naměřeny následující hodnoty:

Tab. 2 Teplotní koeficient reaktivity VVER440 v závislosti na teplotě primárního chladiva při konstantní koncentraci H_3BO_3

	230°C	240°C	250°C	260°C	290°C	300°C	310°C
$\partial\rho / \partial t \cdot 10^{-4}$ [K ⁻¹]	-0,97	-1,1	-1,24	-1,37	-1,77	-1,93	-2,06

Z tabulky je patrné, že pokles $\partial\rho/\partial t$ (v absolutní hodnotě jde o vzrůst) se vzrůstající teplotou chladiva je v podstatě lineární. Hodnoty $\partial\rho/\partial t$ pro střední teplotu chladiva 230 až 260°C jsou naměřené na EDU, hodnoty pro 290 až 310°C byly lineárně extrapolované a následně ověřená dobrá shoda u projektů VVER1000 a VVER1200..

Tab. 3 Teploty chladiva primárního okruhu pro 3 typy VVER reaktorů

Nominální projektové teploty	Typ reaktoru		
	VVER 440	VVER 1000	VVER 1200
t_{vst} do R	267°C	290°C	298,2°C
$t_{výst}$ z R	299°C	320°C	329°C
$t_{stř}$	283°C	305°C	313,6°C

Na obrázcích 9 až 11 jsou závislosti κ_t pro první tři dvanáctiměsíční vsázky VVER 1200 pro porovnání s VVER 440 a 1000. I porovnání mezi jednotlivými vsázkami je zajímavé: počáteční kritická koncentrace H_3BO_3 je:

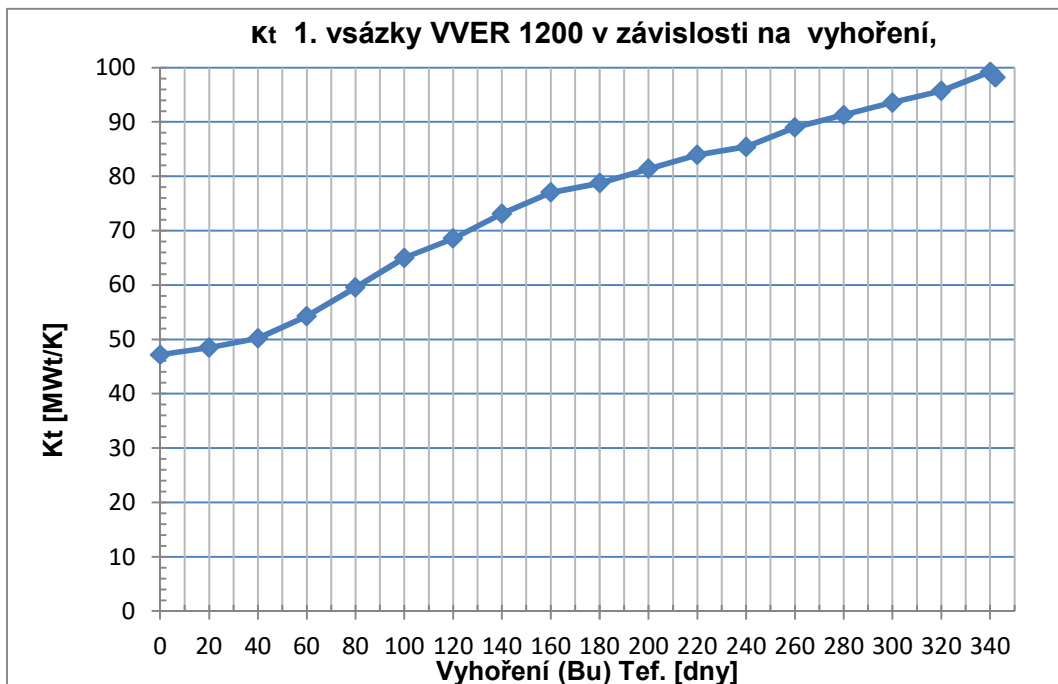
Tab. 4. Počáteční koncentrace kyseliny borité a počáteční κ_t u tří prvních vsázek VVER 1200

	VVER 1200		
	1.vsázka	2.vsázka	3.vsázka
Počáteční $C_{H_3BO_3}$	5,39 g/kg	6,85 g/kg	7,47 g/kg
Počáteční κ_t	47,17 MWt/K	60,87 MWt/K	64,61 MWt/K

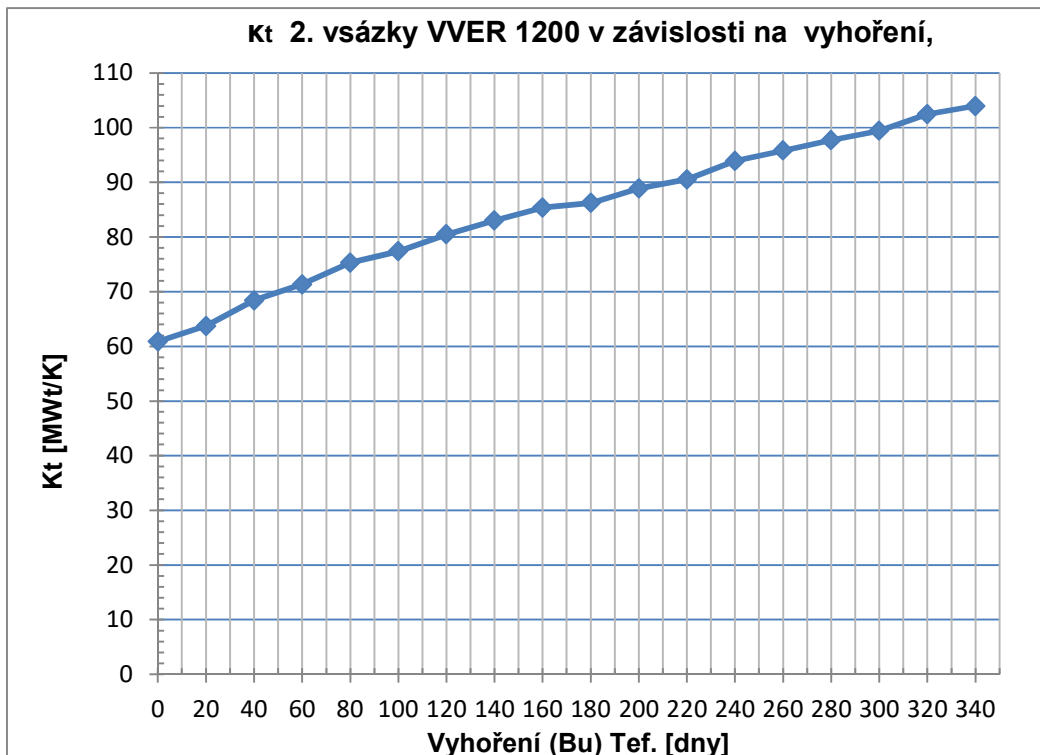
Pozn.: Hodnoty jsou převzaty z Přílohy 3

Se snižující se koncentrací H_3BO_3 v chladivu vzrůstá hodnota teplotního efektu reaktivity. I když mírně roste i výkonový efekt reaktivity, je zřejmé, teplotní roste rychleji a jejich poměr κ_t se zvětšuje.

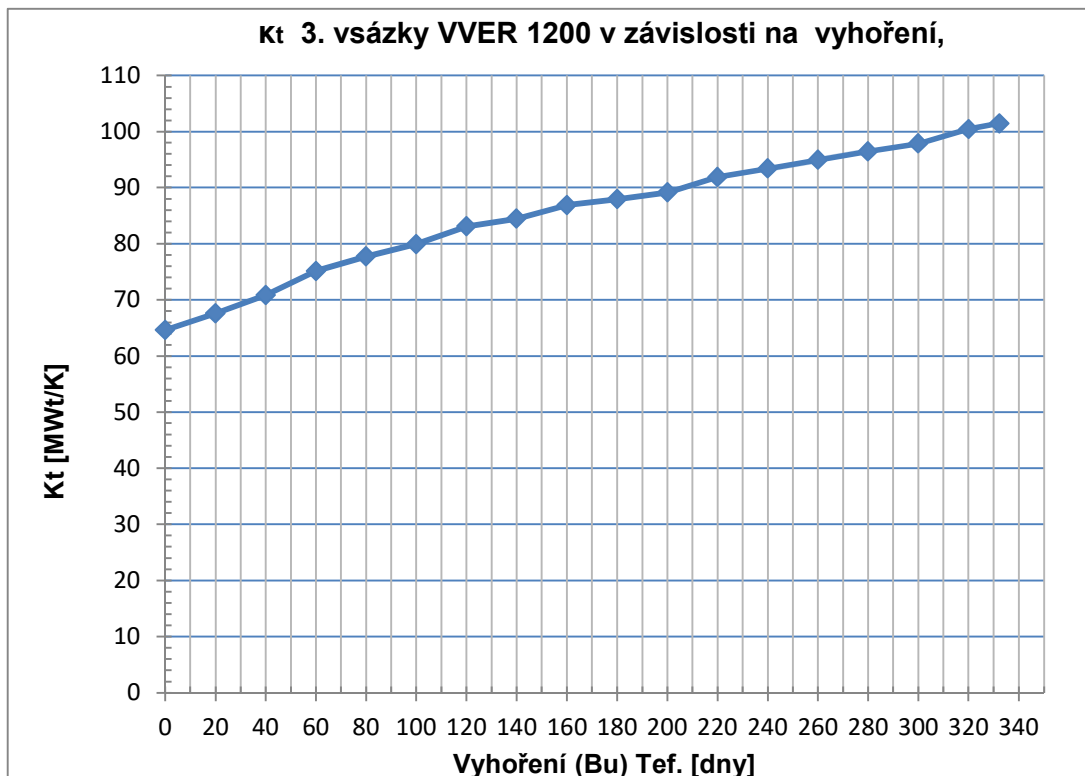
Obr. 9. Závislost κ_t na vyhoření pro 1.zavážku paliva VVER1200



Obr. 10. Závislost κ_t na vyhoření pro 2.zavážku paliva VVER1200



Obr 11. Závislost χ_t na vyhoření pro 3.zavážku paliva VVER1200



Z výše uvedené analýzy lze shrnout:

- Samoregulační schopnost aktivní zóny vzrůstá se snižováním koncentrace H_3BO_3 , která se snižuje úměrně vyhoření. V počátečním období po překládce paliva je u některých aktivních zón využívání samoregulace bloku s korektorem frekvence na mezi možností. Samoregulaci pro PR s korektorem frekvence nastaveným na $\pm 20\text{MWel}$ je proto vhodné začít využívat až teprve tehdy, když χ_t vzroste nad $\sim 60\text{ MWt/K}$. Pro dřívější použití by krajní meze KORf měly být přestaveny na nižší hodnotu, pokud si budeme přát změnu teploty I.O. v mezích $\pm 1\text{K}$.
- Samoregulační schopnost aktivní zóny roste rovněž se vzrůstem střední teploty chladiva, takže pokročilejší projekty s vyššími parametry sekundárního (a proto i primárního) okruhu mají větší naději na uplatnění při primární regulaci frekvence a předávaného výkonu.
- V oblasti okolo $\sim 6,3\text{ MPa}$ odpovídá přibližně $1\text{ K} \sim 0,1\text{ MPa}$, takže $\chi_t \sim 0,1$. χ_p . Budeme-li tedy využívat samoregulaci v mezích $\Delta p = 0,1\text{ MPa}$ (tj. $\pm 0,05\text{ MPa}$), bude střední teplota primárního okruhu kolísat v mezích $\Delta t = 1\text{ K}$, a úměrně při $\Delta p = 0,15\text{ MPa}$ (tj. $\pm 0,075\text{ MPa}$), bude se kolísat střední teplota primárního okruhu v mezích $\Delta t = 1,5\text{ K}$, To by měly být hodnoty určující pro analýzu nastavení regulátorů KO (hladiny a tlaku) pro minimalizaci jejich nežádoucích zásahů.

3.4 OCENĚNÍ VLIVU TEPELNÉ ROZTAŽNOSTI CHLADIVA PRIMÁRNÍHO OKRUHU NA PRŮBĚH REŽIMU SAMOREGULACE

Obr.12 Kompenzátor objemu

Chladivo primárního okruhu mění vlivem teploty svůj objem. Podle tabulek vody a vodní páry lze pro teplotu vody primárního okruhu (240t) v provozní oblasti určit změnu objemu*) o cca $0,72 \text{ m}^3 \cdot \text{K}^{-1}$.

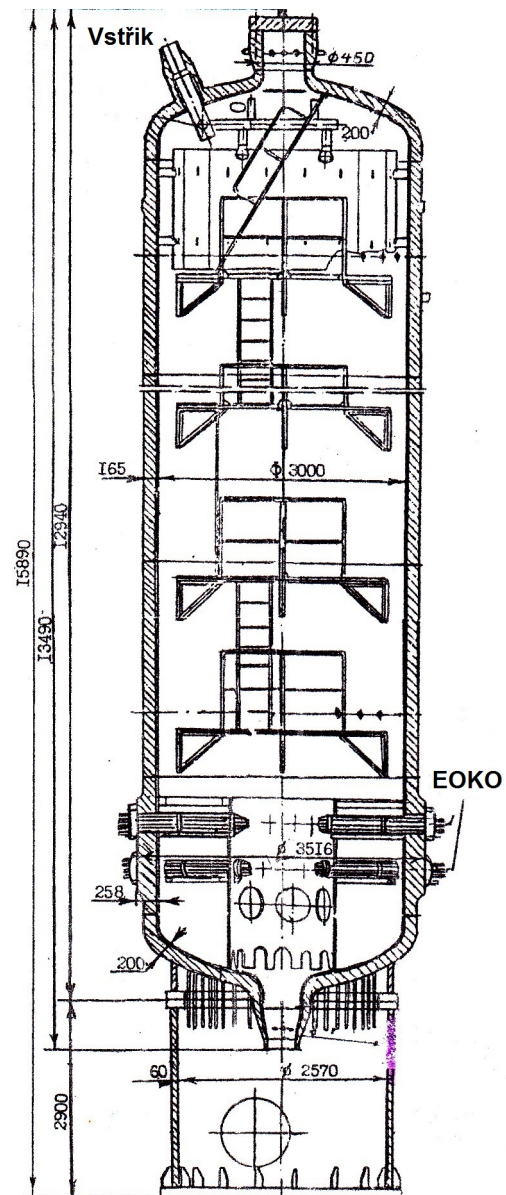
Změna objemu chladiva vyvolá změnu hladiny v kompenzátoru objemu (KO) a tím i změnu tlaku v primárním okruhu. Při větších změnách těchto parametrů může docházet ke změnám v doplňování či odpouštění chladiva vlivem regulace hladiny v KO, ale i k zapínáním či vypínáním elektroohříváků KO, případně o otevření vstříků do KO ve snaze potlačit zvýšený tlak. (Při některých testech popisovaných v kap. 6 se ukázalo, jaké důsledky má nesprávné nastavení těchto regulátorů.)

Vnitřní průměr kompenzátoru objemu je 3 m, takže plocha hladiny (při zanedbání objemu vestavby – žebřík a plošiny pro inspekci vnitřního povrchu) je $7,06 \text{ m}^2$.

Při změně objemu chladiva $0,72 \text{ m}^3/\text{K}$ dojde ke změně výšky hladiny o $\geq 0,101 \text{ m/K}$ bez vlivu vnitřní vestavby kompenzátoru objemu. Ta je příčinou většího zvýšení hladiny, než je vypočítaná. Očekávat lze až cca $0,17 \text{ m/K}$. Před novým měřením doporučuji provést měření přímo na bloku.

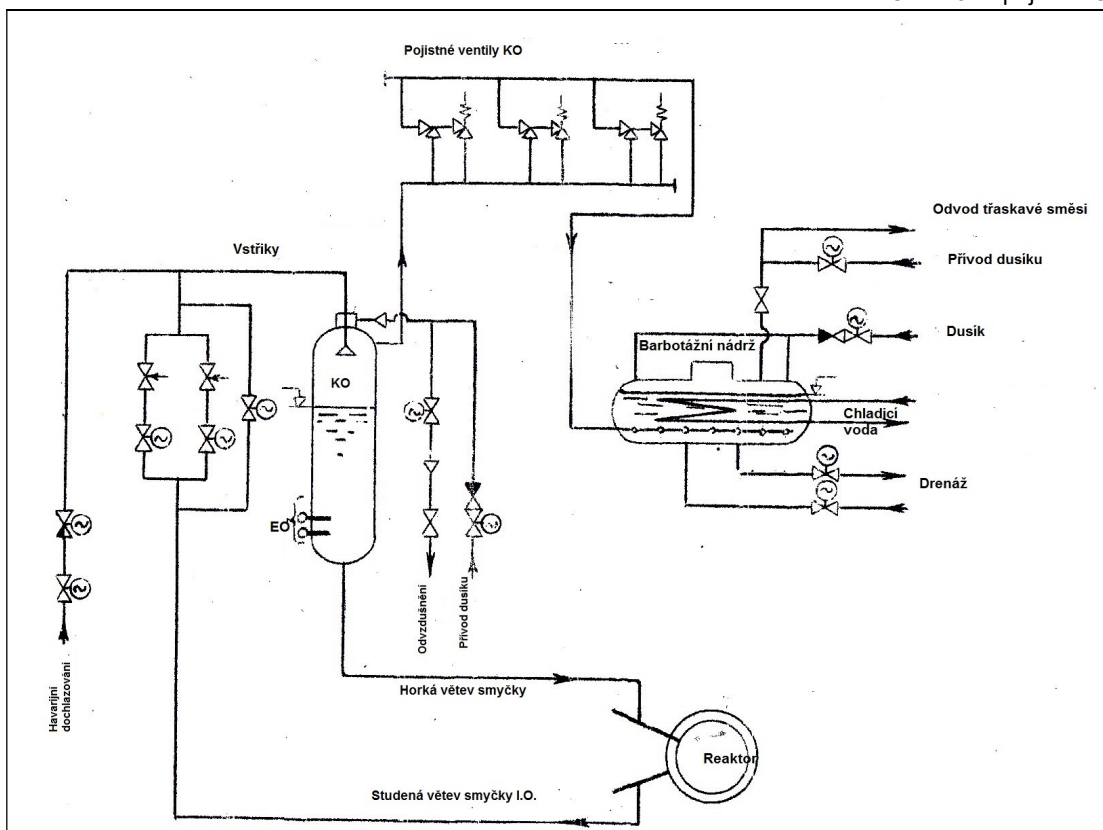
Aby při změnách teploty primárního chladiva nedocházelo k častým zásahům regulátoru hladiny, koriguje se žádaná hodnota hladiny v KO podle teploty primáru, takže změny doplňování a odpouštění chladiva jsou minimalizovány. Pokles/vzrůst tlaku v KO je kompenzován prací elektroohříváků kompenzátoru objemu, resp. vstříky do KO. Proto je důležité regulátory tlaku vhodně nastavit i s případnou vhodnou necitlivostí.

V zájmu co největší stability režimu je pochopitelné, aby změna střední teploty chladiva primárního okruhu byla co nejmenší. Tento zájem jde však proti požadavku co nejvíce využívat teplotního a výkonového efektu reaktivity.



^{*)} Pro teplotu vody 270 až 280°C lze u vody v blízkosti meze sytosti získat rozdíl měrných objemů $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Při vodní náplni primárního okruhu (bez KO) 240t bude změna objemu vody primárního okruhu $0,72 \text{ m}^3 \cdot \text{K}^{-1}$.

Obr. 13 Zapojení KO



Obr. 13 ukazuje potrubní zapojení kompenzátoru objemu pro vysvětlení funkce regulace tlaku v I.O. Pro zvýšení tlaku slouží EOKO, snížení tlaku se dosahuje pomocí vstříků do parního prostoru KO. Tím dojde k potlačení tlaku páry nad hladinou v KO při kompresi po zvýšení hladiny. KO je připojen k horké větvi, vstřík je regulován přítokem studenějšího chladiva z větve studené. Barbotážní nádrž slouží ke kondenzaci páry v případě zapůsobení pojistných ventilů KO.

3.5 REŽIM REGULACE BLOKU NA KONSTANTNÍ TLAK V HPK

Naše tlakovodní jaderné bloky jsou převážně provozovány v režimu udržování konstantního tlaku v HPK, nebo, u bloků s digitálními řídicími systémy, v režimu, který se mírně odlišuje (viz příloha 2). Takový režim se ideálně vyznačuje nevelkými odchylkami tlaku v PG a před TG – o tlakové ztráty mezi PG a HPK a mezi HPK a TG (viz obr. 14)..

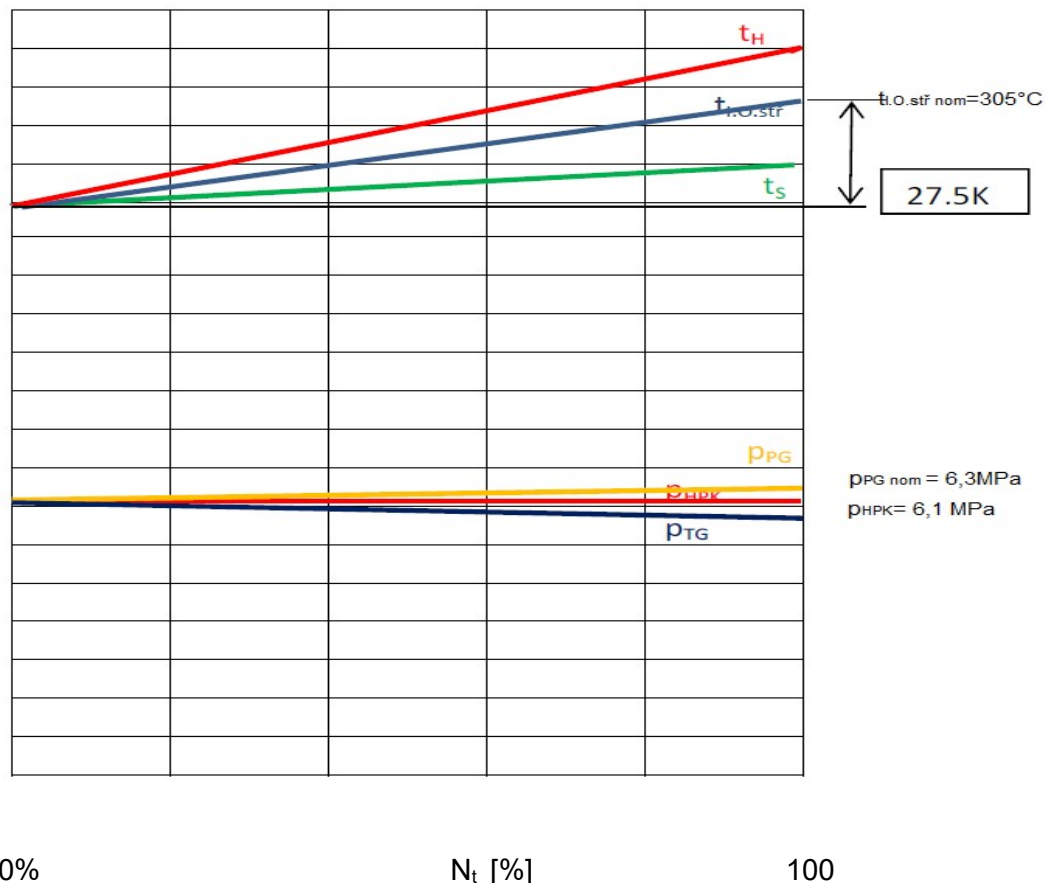
Poznámka: Tlak v HPK je možné regulovat pomocí:

- regulátoru neutronového výkonu reaktoru (velká regulační smyčka)
- regulátoru tlaku před TG regulátorem TG (malá regulační smyčka)

Křivky teplot $t_{l.o.stř}$, t_H , t_{CH} , t_s , vychází při nulovém výkonu ze stejné hodnoty: teploty sytosti vody v PG, která je pro VVER 1000 $t_s = 278^\circ\text{C}$ odpovídající tlaku sytosti $p_s = 6,1 \text{ MPa}$.

Tento režim se vyznačuje potřebou zvyšování střední teploty chladiva primárního okruhu $t_{l.o.stř}$ v závislosti na výkonu. U VVER 1000 jde o přibližnou směrnicí $27,5\text{K}/3000\text{MWt} = 0,00917 \text{ K/MWt}$, nebo $27,5 \text{ K}/100\% = 0,275 \text{ K}/\%$ (modrá křivka).

Obr. 14 Závislost základních parametrů VVER 1000 na výkonu v původním projektu ETE



Poznámka:

1. Při dodatečném projektování digitálního řídicího systému byly umožněny i úpravy v režimech regulátorů bloku, které původní regulátor neumožňoval. Pro systém řízení reaktoru jsou k dispozici návrhy různých „křivek“ určujících jednak pracovní oblast, jednak průběh parametrů v závislosti na výkonu. Zkušenost ukazuje, že tyto křivky jsou pro praktický provoz využívány zejména pro větší změny výkonu. Základní kombinací regulace bloku využívané na ETE je regulace na konstantní elektrický výkon generátoru se zapnutým korektorem tlaku v HPK. Jde o velmi praktickou kombinaci využívanou již od konce energetického spouštění V1 v Jaslovských Bohunicích pro ustálený provoz na výkonu.
2. V příloze 2 jsou uvedeny křivky K1 až K5. V současné době jsou bloky provozovány s výkonem zvýšeným z 3000 na 3120 MWt. Úvahy v této práci jsou vztaženy k původnímu nominálnímu výkonu 3000 MWt. protože testy režimů primární regulace frekvence (PR), jejichž výsledky jsou k dispozici (kap. 6), byly prováděny v prvním roce provozu před změnou projektu umožňující zvýšení tepelného výkonu reaktoru. Závěry předkládané práce jsou však použitelné i pro zvýšený výkon.
3. Nejblíže průběhu původního projektového režimu (z obr.14) je křivka K5 přílohy 2, která však vychází při nulovém výkonu reaktoru z teploty I.O. 283°C a tomu odpovídajícímu tlaku sytosti v PG 6,5 MPa. Směrem ke 100% výkonu tlak v PG klesá až na 5,92 MPa. Směrnice střední teploty proto bude pro tento případ $22 \text{ K} / 3120 \text{ MWt} = 0,00705 \text{ K} / \text{MWt}$, nebo $22 \text{ K} / 100\% = 0,22 \text{ K}/\%$.
4. V čisté samoregulaci pro regulaci frekvence však není využívána žádná z křivek přílohy 2, neboť jediným regulovaným parametrem na bloku je elektrický výkon generátoru se zapojeným korektorem frekvence. Tlak v HPK i v PG a tím i teplota sytosti v PG reagují (v určitých nastavených mezích) volně na poruchy v síti.

Samoregulace při režimu blízkém nominálnímu tlaku v HPK je jednoznačná:

Změna střední teploty chladiva I.O. znamená změnu tepelného výkonu reaktoru úměrně „kappa“ = κ_t

S využitím (10) a (11) můžeme napsat pro okamžitou počáteční změnu :

$$dN_{R0} = -\kappa_t \times d\bar{t}_{I.O.0} \quad (12)$$

Změna střední teploty primárního okruhu bude při pomalých změnách v prvních okamžicích přibližně sledovat změny teploty sytosti v parogenerátoru (PG).

$$d\bar{t}_{I.O.0} = dt_s \quad (13)$$

avšak vlivem závislosti střední teploty I.O na výkonu reaktoru dojde po (několika obězích chladiva) k ustálení na hodnotě

$$d\bar{t}_{I.O} = dt_s + \frac{\partial t_{I.O.}}{\partial N_R} \times dN_R = dt_s + 0,00917 \times dN_R \quad (14)$$

Pokud bude regulátor TG (prostřednictvím KORf) na požadavek soustavy zvyšovat (snižovat) elektrický výkon, dojde k otevírání (přivírání) regulačních ventilů turbíny a ke snižování (zvyšování) tlaku páry v hlavním parním kolektoru (HPK) a tedy i v PG.

Poznámka: korektor tlaku v HPK by měl by být vypnutý, případně zapnutý s nastavenou rozšířenou necitlivostí (mrtvým pásmem). Pro samoregulační proces by byla vhodná necitlivost $\Delta p_{HPK} \pm 0,1 \text{ MPa}$. (v dnešní době je nastavena na $0,18 \text{ MPa}$)

Protože změna teploty sytosti páry:

$$dt_s = \frac{\partial t_s}{\partial p_s} \times dp_{PG} = 10,7 [K / \text{MPa}] \times dp_{PG} [\text{MPa}] \quad (15)$$

(pro tlak $6,3 \text{ MPa}$ v PG je při změně tlaku v PG je $\partial t_s / \partial p_s = 11,21 \text{ K.MPa}^{-1}$) o dp_{PG} dojde ke změně dt_s a se zpožděním i ke změně $d\bar{t}_{I.O}$. Následně dojde uvolněním teplotního efektu ke změně výkonu reaktoru o

$$dN_{R_0} = -\kappa_t \times \frac{\partial t_s}{\partial p_s} \times dp_{PG_0} \quad [\text{MWt}] \quad (16)$$

takže úpravou pro stav po ustálení:

$$-d\bar{t}_{I.O} \cdot \kappa_t = -dt_s \cdot \kappa_t + \frac{\partial t_{I.O.}}{\partial N_R} \cdot dN_R \cdot \kappa_t$$

$$dN_R = dN_{R_0} + \frac{\partial t_{I.O.}}{\partial N_R} \cdot dN_R \cdot \kappa_t$$

získáme

$$dN_R = \frac{dN_{R_0}}{1 - \kappa_t \times \frac{\partial t_{I.O.}}{\partial N_R}} \quad (17)$$

Při označení součinnu

$$\kappa_t \cdot \frac{\partial t_s}{\partial p_s} = \kappa_{Po} \quad [\text{MWt/MPa}] \quad (18)$$

resp.

$$\frac{\kappa_{p0}}{1 - \kappa_t \cdot \frac{\partial t_{l.o.}}{\partial N_R}} = \kappa_p \quad [\text{MWt/MPa}] \quad (19)$$

Ize pro počátek děje psát

$$dN_{R0} = -\kappa_{p0} \times dp_{PG} \quad [\text{MWt}] \quad (20)$$

a po ustálení

$$dN_R = -\kappa_p \times dp_{PG} \quad [\text{MWt}] \quad (21)$$

Příklad: Pro ETE budeme v okolí pracovní teploty brát hodnotu $\frac{\partial t_s}{\partial p_s} = 10,7 \cdot 10^{-6} [K / Pa] = 10,7 [K / MPa]$ a hodnotu $\frac{\partial t_{l.o.}}{\partial N_R} = 0,00917 [K / MWt]$, (tj 27,5K/3000 MWt podle původního projektu) a tedy, dosadíme-li do vztahu (21) např. konkrétní hodnotu i za $\Delta p_{PG} = 0,15 \text{ MPa}$:

$$\Delta N_R = -\kappa_p \cdot \Delta p_{PG} = - \frac{\kappa_t [MWt / K] \cdot 10,7 [K / MPa]}{1 - \kappa_t [MWt / K] \cdot 0,00917 [K / MWt]} \cdot 0,15 [MPa] \quad (22)$$

Pro první vsázku ETE byla $\kappa_t \in \langle 20 ; 45 \rangle$ a tedy $\kappa_p \in \langle 262 ; 820 \rangle$. Změna tepelného výkonu reaktoru pro zmíněné meze bude podle (22) $\Delta N_{Rt} \in \langle 39,3 ; 122 \rangle$ MWt.. Pro vsázky (cyklus 12 až 14) v podstatě začíná ΔN_R na konci hodnot první vsázky. (viz obr. 9).

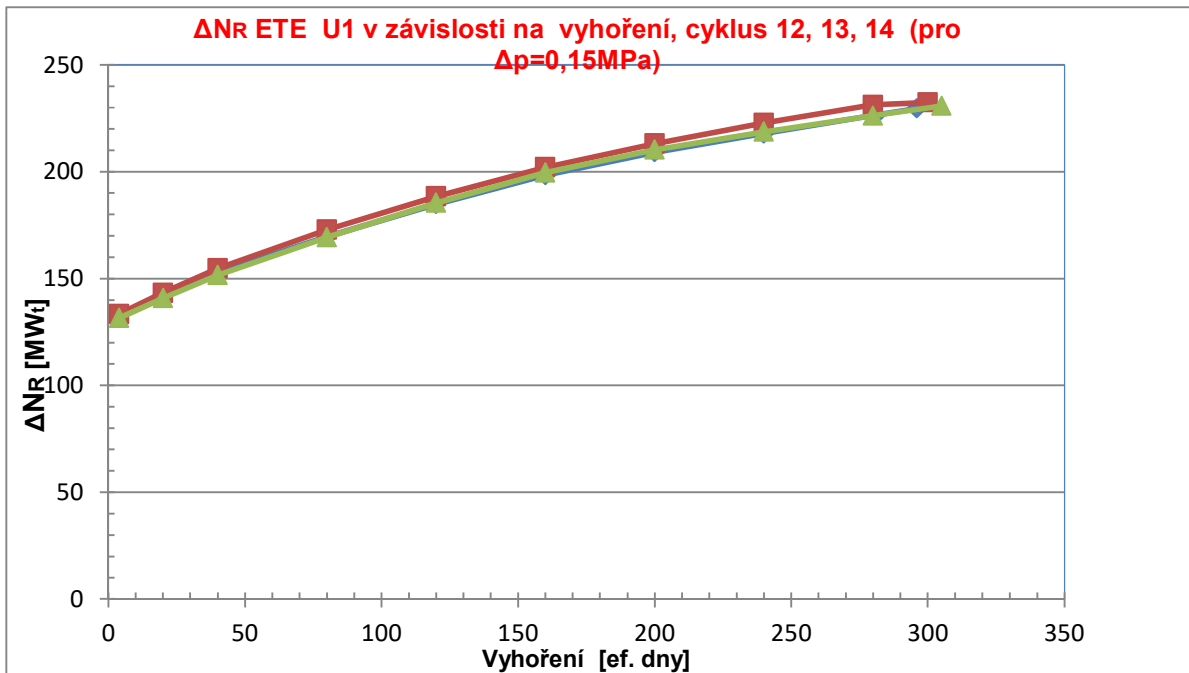
Pro křivku K5 a nové nastavení související se zvýšeným výkonem na 3120 MWt bude $\frac{\partial t_{l.o.}}{\partial N_R} = 22 / 3120 = 0,00705 [K / MWt]$

$$\Delta N_R = -\kappa_p \cdot \Delta p_{PG} = - \frac{\kappa_t [MWt / K] \cdot 10,7 [K / MPa]}{1 - \kappa_t [MWt / K] \cdot 0,00705 [K / MWt]} \cdot 0,15 [MPa] \quad (23)$$

Změna tepelného výkonu ΔN_R je sice funkcí vyhoření (protože κ_t a tedy i κ_p je funkcí vyhoření) ale z hlediska okamžitého času, kdy je možné změnu vyhoření zanedbat, je přímo úměrné pouze Δp_{PG} .

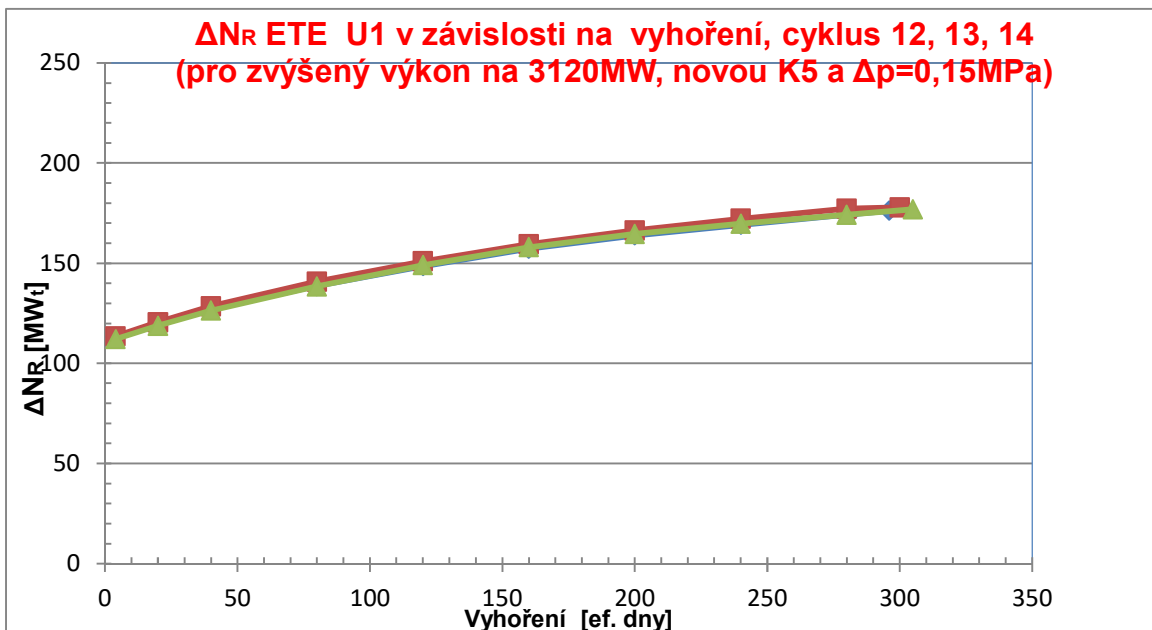
Průběhy ΔN_R mohou být poskytnuty buď pro změnu střední teploty primárního okruhu (obr. 6 až 11), nebo pro pevně danou změnu Δp_{HPK} jako je na následujícím obrázku č. 15.

Obr. 15. ΔN_R [MWt] pro U1 ETE dle vztahu (22),



Při odchylkách tlaku v HPK o Δp_{HPK} bude docházet ke zvyšování / snižování teploty sytosti v PG a křivka střední teploty I.O. se bude ekvidistančně posouvat nahoru / dolů okolo one modré křivky z obr. č. 14. Na obr. 16 jsou průběhy ΔN_R pro zvýšený výkon 3120 MWt.

Obr. 16. ΔN_R [MWt] pro U1 ETE dle vztahu (23), cyklus 12, 13, 14

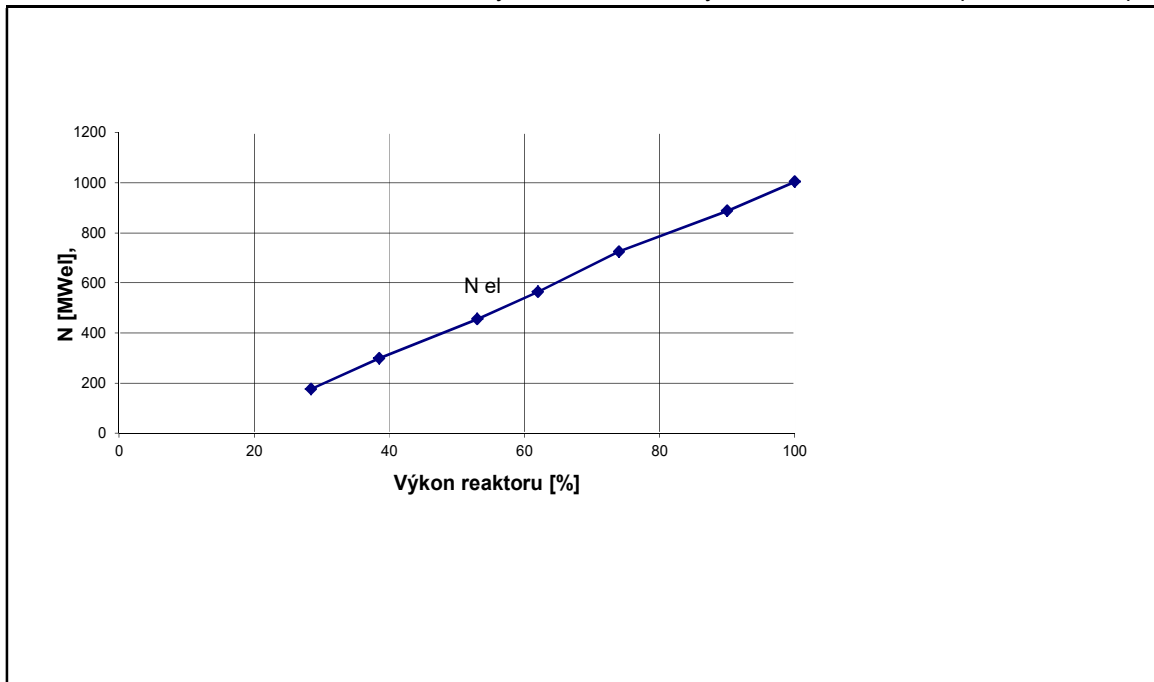


Při skutečném režimu se budou měnit jednak hlavní parametry (tlak v PG a střední teplota chladiva v I.O., ale i další, které jsou na změnách hlavních parametrů závislé. Je to zejména kolísání hladiny chladiva v kompenzátoru objemu (KO) vlivem tepelné roztažnosti a tím i změna tlaku v primárním okruhu. Z toho mohou vyplývat nároky na jiné regulace : doplňování a odpouštění chladiva z I.O., zapínání a vypínání elektroohříváků KO (EOKO) a naopak otevírání vstřiků do KO pro potlačení vzrůstu tlaku.

4. VLIV REGULACE TURBOGENERÁTORU

Na obr. 17 je závislost elektrického výkonu na výkonu reaktoru změřená během energetického spouštění na ETE. Podobná závislost je i u jiných současných bloků s tlakovodními reaktory.

Obr. 17. Závislost elektrického výkonu TG ETE na výkonu reaktoru získaná při uvádění do provozu



Jak ukazuje obr.17, v rozsahu výkonů 90 až 100% nominálního výkonu bloku představuje:

- změna el. výkonu TG o 1% N_{el} změnu výkonu reaktoru o 0,862 % N_{nom} (resp. naopak),
- změně výkonu reaktoru o 1% N_{nom} odpovídá změna el. výkonu o cca 1,16 % N_{el} .

Regulátory TG na slovenských a českých jaderných elektrárnách doznaly od spuštění JE V1 značných změn. Zatímco na EBO V1 byla až do ukončení jejího provozu plně hydraulická regulace, na ostatních blocích VVER 440 byla v průběhu inovací regulace zaměněna za elektronickou. Protože mnohde ve světě mají turbogenerátory ještě hydraulickou regulaci, popisuje kapitola 3bf.1 vlastnosti využitelné při samoregulaci frekvence.

4.1 HYDRAULICKÁ REGULACE TURBÍNY S HYDRAULICKÝM REGULÁTOREM OTÁČEK

Původní regulace TG na EDU i ETE byla zcela hydraulická s proporcionálním hydraulickým regulátorem otáček (propeler na hřídeli TG poskytující primární tlak regulačního oleje). Specifikem této regulace bylo (a u některých TG v elektrárnách v zahraničí dosud je), že při provozu TG po nafázování a zvýšení výkonu bez zapnutí regulace elektrického výkonu, nebo regulace tlaku v HPK – tj. v ručním ovládní polohy regulačních ventilů TG, dochází při změnách frekvence v síti, k níž je TG přifázován, ke změnám elektrického výkonu vlivem charakteristiky regulátoru otáček TG, k otevírání či přivírání regulačních ventilů.

Při snížení frekvence v síti otáčkový regulátor otevírá regulační ventily TG ve snaze vyrovnat úbytek otáček TG, avšak vzhledem k nemožnosti zvýšení otáček nafázovaného TG, dojde ke zvýšení výkonu TG.

Proporcionalita otáčkového regulátoru TG se obvykle nastavuje

$$\Delta n / \Delta Z = -150 \text{ min}^{-1} / 100\%Z = -5\% \text{ min}^{-1} / 100\%Z \quad (23)$$

$$\text{tj,} \quad \Delta f / \Delta z = -2,5 \text{ Hz} / 100\%Z \quad (23')$$

kde Z je plné otevření regulačních ventilů TG. Snížení otáček o 5% od jmenovitých znamená změnu otevření regulačních ventilů o 100%.

V oblasti okolo nominálního otevření regulačních ventilů je podle charakteristiky ventilů např. obr. 15

$$\Delta N_{TG} / \Delta Z \approx 34\% N_{TG}^{nom} / 100\%Z \quad (24)$$

Kde ΔN_{TG} je určeno podle tečny ke křivce charakteristiky reg. ventilu v oblasti nominálního otevření.

$$\text{Proto lze napsat} \quad \Delta n / \Delta N_{TG} = \frac{\Delta \bar{n}}{\Delta Z} \cdot \frac{\Delta \bar{Z}}{\Delta N_{TG}} \approx -\frac{150 \text{ ot/min}}{34\% N_{TG}^{nom}} \quad (25)$$

150 ot/min odpovídá 2,5Hz. Tedy

$$\Delta f / \Delta N_{TG} \approx -2,5 \text{ Hz} / 34\% N_{TG}^{nom} \quad (26)$$

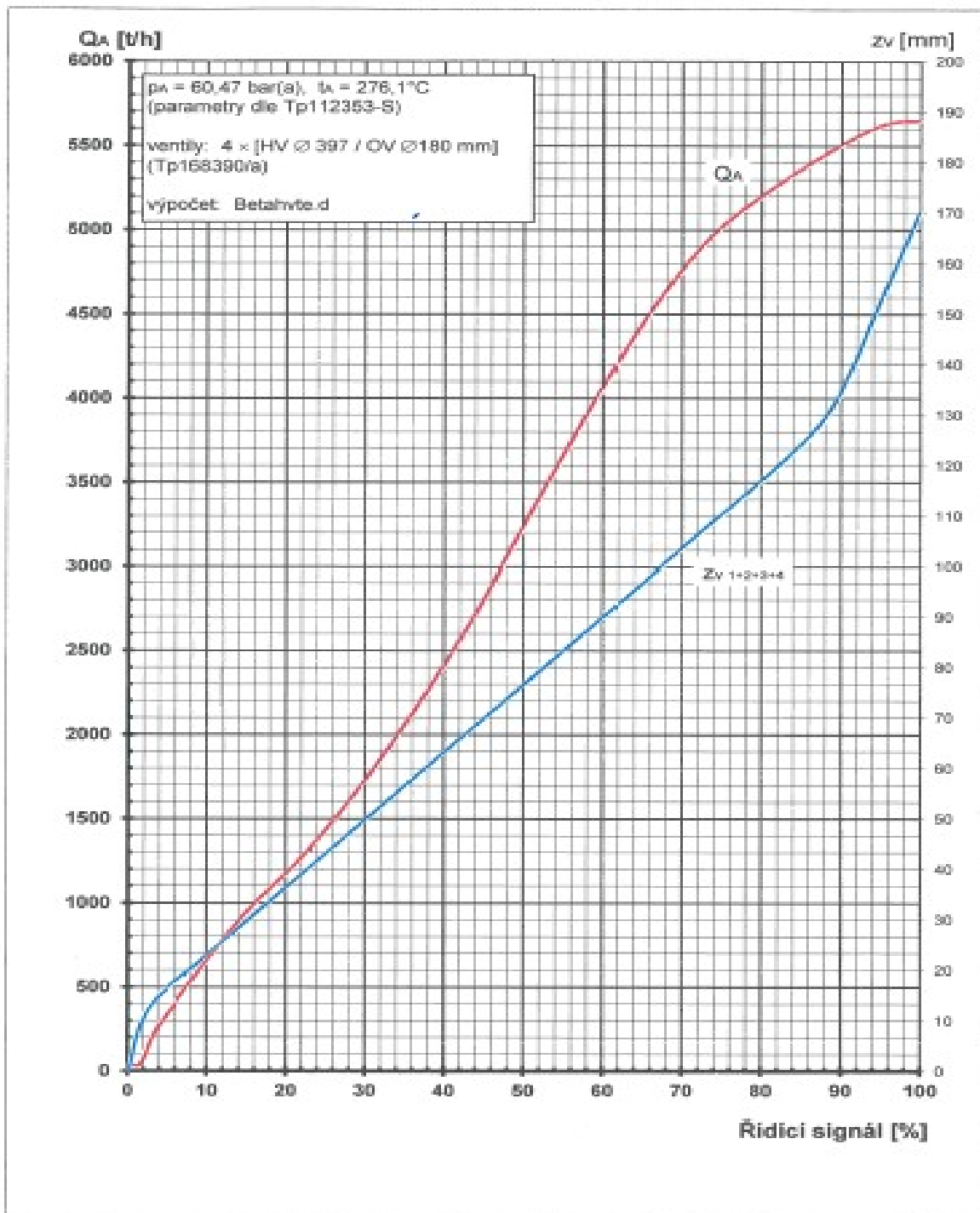
resp.

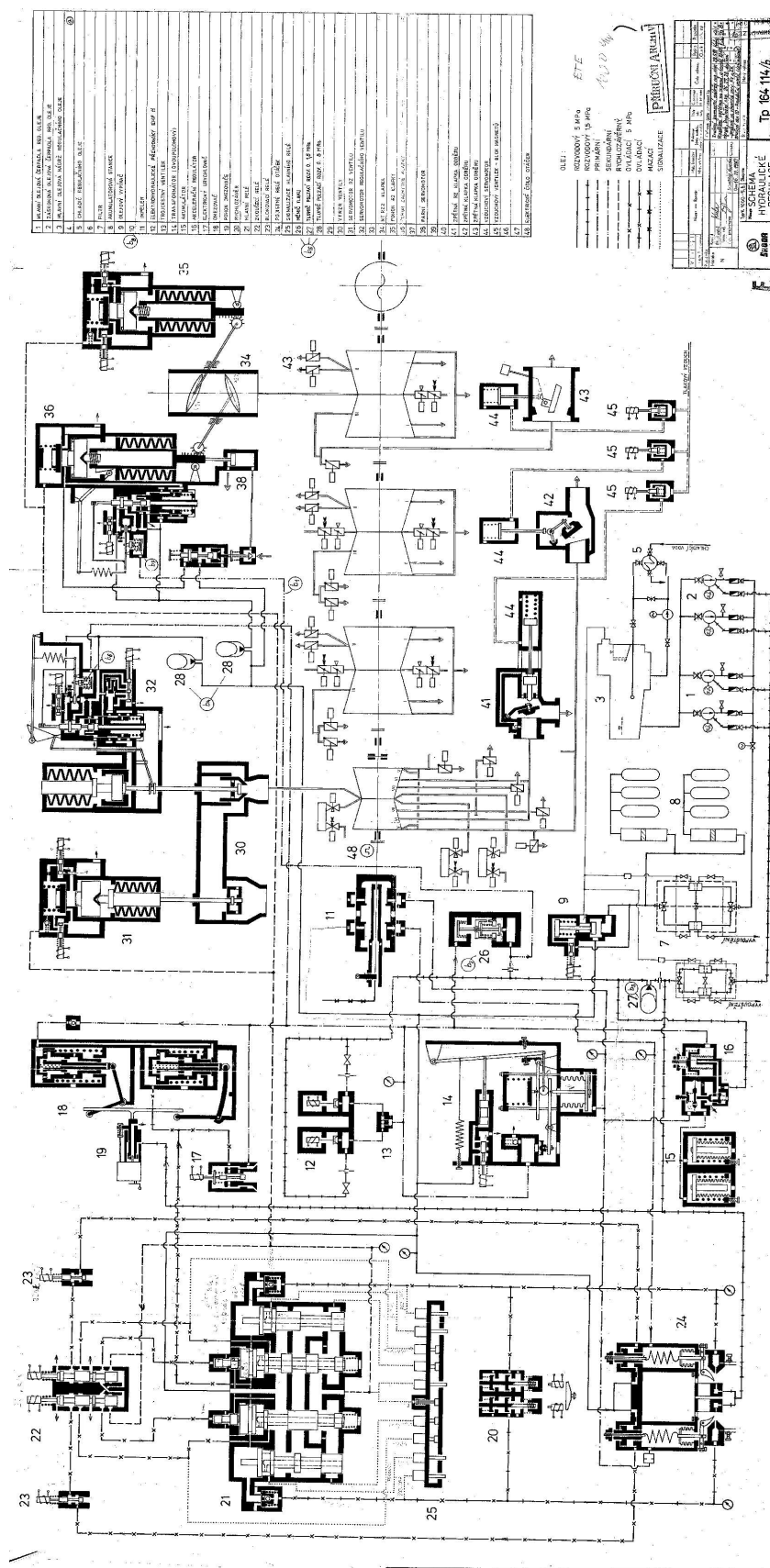
$$\partial N_{TG} / \partial f \approx -13,6\% N_{TG}^{nom} / \text{Hz} \quad (27)$$

čili, při změně frekvence $\pm 0.05 \text{ Hz}$, by změna elektrického výkonu TG byla $\mp 0,68\% N_{TG}^{nom}$.

Takže např. při $N_{TG}^{nom} = 1000\text{MW}$ by byl $\partial N_{TG} / \partial f = -136\text{MWe/Hz}$, (28)

Obr.18 Charakteristika regulačních ventilů pro turbíny ETE (podle Tp103808-D Škoda Power Doosan)





Obr.19 Původní hydraulická regulace turbín ETE – hydraulický regulátor otáček

Nafázovaný TG s hydraulickou regulací otáček, by byl v režimu ručního ovládání schopen měnit produkovaný elektrický výkon podle změny frekvence s proporcionalitou podle (28).

Změna frekvence v síti o $\mp 0,05$ Hz vyvolá vlivem uvedené vlastnosti regulátoru otáček TG (v ručním režimu regulace TG) změnu výkonu TG o cca $\pm 0,68$ % a změnu výkonu reaktoru o $\pm 0,586\%$ N_{nom} .

Při změně frekvence o $\mp 0,0833$ Hz (což odpovídá změně otáček TG o ∓ 5 ot/min) by se výkon TG měnil o $\pm 1,13$ % N_{nom} (při nominálním výkonu 1000MWel generátoru $\pm 11,3$ MW) a výkon reaktoru $\pm 0,974\%$ N_{nom} .

Poznámka:

1. Výše uvedené vztahy, vycházející z (24) platily pro hydraulickou regulaci turbín EDU před přechodem na elektronickou regulaci. Pro turbíny ETE, platily s omezením, neboť transformátor 14 primárního na sekundární olej plnil roli ochrannou a nedovolil přímou transformaci tlaku primárního oleje na sekundární.
2. Výše uvedené vztahy, vycházející z (24) platily pouze v oblasti, kolem nominálního otevření regulačních ventilů. Při částečných zatíženích je nutné vycházet z jiných tečen z oblastí charakteristiky (větší směrnice).

Vzhledem k přebudování regulace turbína na regulaci elektronickou jsou výše uvedené vztahy už jen ryze teoretické a není s nimi potřebné počítat pro další úvahy, nicméně pro úplnost:

V závislosti na velikosti κ_p by výše uvedeně změně výkonu odpovídala různá odchylka tlaku v PG a v HPK od zadané hodnoty charakterizovaná převrácenou hodnotou κ_p . Tomu bude odpovídat i velikost změny střední teploty chladiva I.O. Při nízkém κ_p by byla změna tlaku velká a naopak.

Protože podle (28) $\partial N_{TG} / \partial f = -136 [MW_{el} / Hz]$, a podle (21) můžeme napsat

$$\frac{\partial N_R}{\partial f} = -\kappa_p \times \frac{\partial p_{PG}}{\partial f} \quad \text{a tedy} \quad \frac{\partial p_{PG}}{\partial f} = -\frac{1}{\kappa_p} \times \frac{\partial N_R}{\partial f} \quad (29)$$

S dobrým přiblížením je $\partial N_R \sim 3 \cdot \partial N_{TG}$

$$\frac{\partial p_{PG}}{\partial f} = -\frac{1}{\kappa_p} \times 3 \times \frac{\partial N_{TG}}{\partial f} = -\frac{1}{\kappa_p} \times \frac{1000 MW_t}{Hz} \quad [\text{Pa/Hz}] \quad (30)$$

Změna tlaku v PG odpovídající změně frekvence by byla v takovém režimu

$$dp_{PG} = -\frac{1}{\kappa_p} \times 3 \times \frac{\partial N_{TG}}{\partial f} = -\frac{1}{\kappa_p} \times 1000 \times df \quad (31)$$

κ_p bylo pro počáteční (tj. 1. a 2.) vsázky ETE 247 až 789 MWt/MPa, takže dp_{PG} by bylo (4,05 až 1,27).df. Při změně frekvence pouze o 0,0833 Hz by změna tlaku v PG musela

být o 0,337 až 0,106 MPa. To jsou hodnoty už vysoké a měly by za následek i značné změny střední teploty chladiva reaktoru a tím i velké změny hladiny v kompenzátoru objemu.

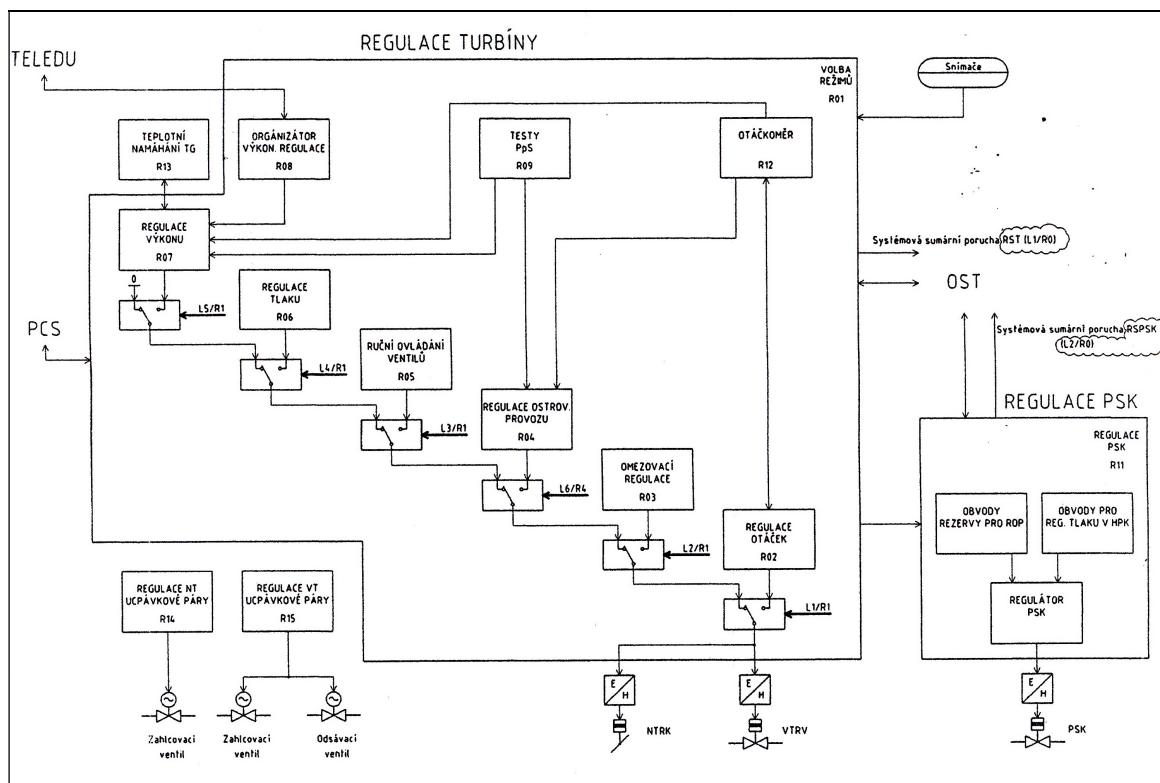
κ_p pro vsázky 12 až 14 je v mezích 750 až 1180 MWt/MPa, takže $dp_{PG}=(1,333$ až $0,847)$.df. Při změně frekvence o 0,0833 Hz by změna tlaku v PG byla o 0,111 až 0,070 MPa, což jsou hodnoty z hlediska provozních režimů přijatelné.

Lze tedy učinit závěr, že provozování TG s hydraulickou regulací i v ručním ovládní bylo možné využít pro účely využívání samoregulace bloku pro rovnovážné vsázky, jak ukazují hodnoty pro 12. až 14. cyklus. Vzhledem k rekonstrukci řízení turbíny a záměny za elektronickou, jsou úvahy uvedené v této kapitole již překonané.

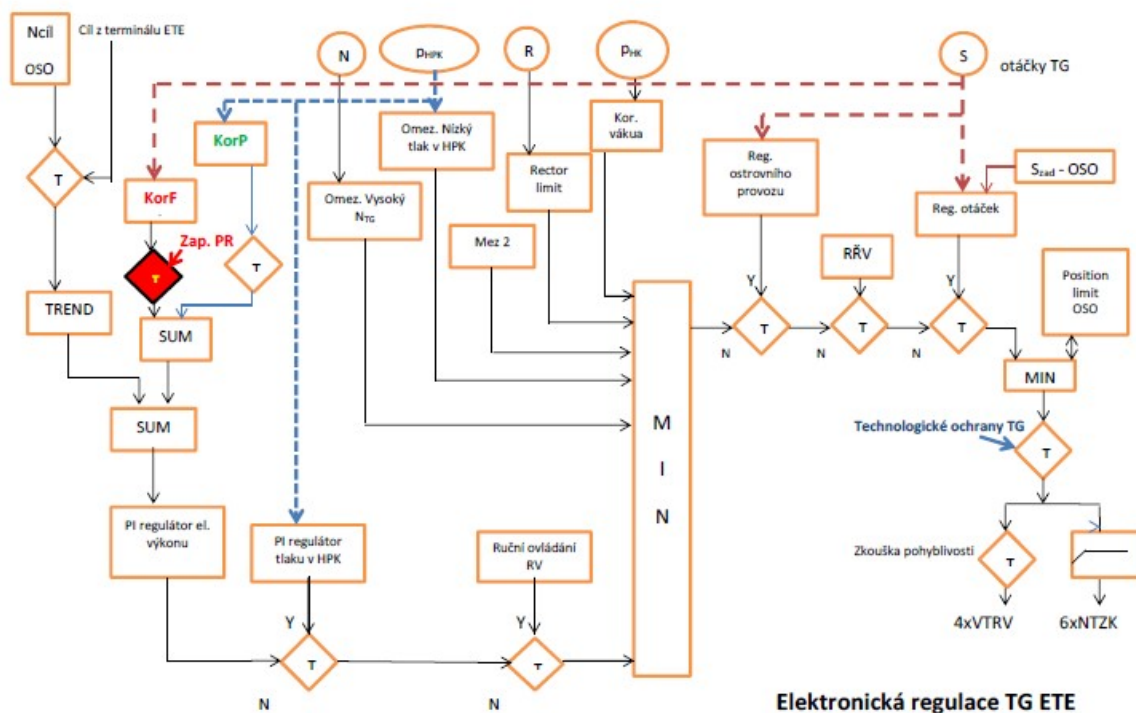
4.2 ELEKTRONICKÁ REGULACE TURBÍNY S ELEKTRONICKÝM REGULÁTOREM OTÁČEK

Turbogenerátory na všech slovenských (EBO, EMO) i českých (EDU, ETE) jaderných blocích mají již modernizovanou elektronickou regulaci, takže výše uvedené vlastnosti hydraulického regulátoru otáček u nich už nelze využívat. U elektronické regulace se regulátor otáček po náfázování odpojí a čeká na hodnotě 3000 ot/min na odfázování. Viz. obr. 20 a 21. Hydraulika je použita pouze na ovládání regulačních ventilů a klapek (=převod elektrického signálu na hydraulický). Účast na samoregulaci bloku je s elektronickou regulací otáček TG nemožná.

Obr. 20 Elektronická regulace TG použitá pro EDU (převzato z výkresu V226-30P-6L171)



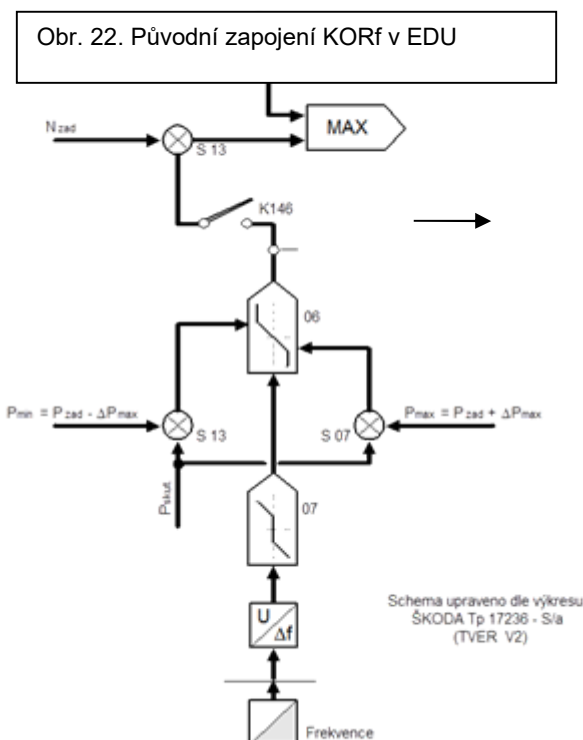
Obr. 21 Elektronická regulace temelínských TG



4.3 TG V REGULACI ELEKTRICKÉHO VÝKONU GENERÁTORU SE ZAPNUTÝM KOREKTOREM FREKVENCE

V regulaci turbín EBO V2, u EDU i ETE je řešen režim regulace elektrického výkonu s korektory od tlaku v HPK, od vakua a korektorem frekvence (KORf). Zapojení korektoru

frekvence je patrné z předcházejících dvou obrázků. Korektor frekvence je zapojován do činnosti operátorem pro účast výrobního bloku na režimu primární regulace. KORf koriguje zadaný elektrický výkon elektrického generátoru podle odchylky frekvence od zadané nominální hodnoty. Jeho původní zapojení do regulačního obvodu je na obrázku vlevo. Uvádím jej pro jeho názornost. Původní korektory frekvence byly nastaveny s určitou necitlivostí frekvence, v jejímž rámci KORf do změny zadaného výkonu nezasahoval. Tato necitlivost je na obr. 18 (blok 07) zachycena. V průběhu provozu pak byl korektor upraven tak, že necitlivost byla nastavena na nulu, takže po jeho zapnutí bude do regulace frekvence zasahovat trvale.



Korektor frekvence má nastavitelnou charakteristiku (vlivnost i meze). Příklad je uveden na obr. 23.

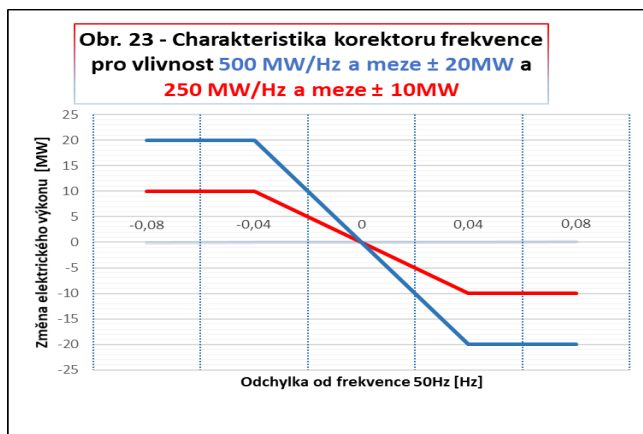
Od korektoru frekvence se ve vztahu k frekvenci očekává principiálně obdobná činnost jako od hydraulického regulátoru otáček, řešená ovšem prostřednictvím elektronických obvodů s nastavitelnou vlivností, např. $K_{KOR} = - 500 \text{ MW/Hz}$, ale s možností omezení horního i dolního maxima. Pro využití pro primární regulaci jsou tč. navoleny meze $\pm 20 \text{ MW}/0,08\text{Hz} = \pm 250 \text{ MW/Hz}$. V daném případě jde o změny elektrického výkonu $\pm 2\%$, čemuž by odpovídal požadavek na změny tepelného výkonu reaktoru cca $\pm 1,724 \%N_{nom}$. To je rozsah výkonů, které je reaktor schopen bez problémů zvládnout při rozvinuté samoregulaci.

Poznámka:

Statika korektoru frekvence (KORf) je z definice
$$s = \frac{\frac{\Delta f}{f}}{\frac{\Delta N_e}{N_e}} \cdot 100[\%],$$

resp. jeho vlivnost je $v = - 500\text{MW/Hz}$ při $s=4\%$, a $- 250\text{MW/Hz}$ při $s= 8\%$. Budeme-li od reaktoru požadovat příspěvek do regulace předávaného výkonu $\pm \delta_{R\max} \%N_{nom}$, potom zřejmě střední hodnota okolo níž bude blok regulovat musí být

$$\overline{N}_R = (N_R^{\max} - \delta_{R\max} \%N_{nom}) \quad (32)$$



neboť povolený maximální výkon nesmí být překročen, přičemž δ_R je nezbytné stanovit maximálně tak, aby byla splněna i nejbližší omezující technologická podmínka.

Ukazuje se, že takřka všechny podmínky (kromě maximálního dovoleného výkonu) souvisí s odchylkou tlaku páry v HPK, takže předepíšeme-li $\pm \Delta p_{\max}$, bude

$$\delta_{R\max} = -\kappa_p \cdot \Delta p_{\max} \quad (33)$$

a tedy

$$N_R = \overline{N}_R \pm \delta_{R\max} \quad [\%] \quad (34)$$

přičemž pro případ provozu, kdy $N_R^{\max} \leq 102\% N_{nom}$, lze (34) s použitím (32) přepsat do tvaru:

$$N_R = (102 - \delta_{R\max}) \pm \delta_{R\max} \quad (35)$$

resp. s použitím (33) :

$$N_R = (102 + \kappa_p \times \Delta p_{\max}) \mp \kappa_p \times \Delta p_{\max} \quad [\%N_{nom}] \quad (36)$$

v blízkosti nominálního výkonu je

$$\delta_{TG} \approx 1,16 \cdot \delta_R \quad [\%] \quad (37)$$

Ze vztahu (36) je patrné, že pokud by bylo pevně zadané Δp_{\max} , bylo by možné využívat zvětšující se odchylky. při zvětšujícím se κ_p v čase. Hodnotu $\pm \delta_{\max}$ i \overline{N}_R , by však bylo nutné měnit, aby nebyl převyšeno $N_R^{\max} = 102\%N_{nom}$.

Maximální přípustná projektová změna tlaku v HPK $\Delta p_{\max} \leq \pm 0,15$ MPa (na ETE je tč. nastavena rozšířená necitlivost $\pm 0,182$ MPa, přičemž normální necitlivost je $\pm 0,13$ MPa) vychází z projektových požadavků. Překročení těchto mezí je třeba zabránit, aby nedošlo k přiblížení se jiným parametrům nastaveným na blokádách či ochranách, které by funkci příspěvku pro regulaci frekvence rušily. Případné zapnutí korektoru tlaku v HPK jde však proti snahám vyhovět potřebám sítě. Z praktických důvodů je proto lepší nevyužívat celou přípustnou změnu tlaku páry v HPK.

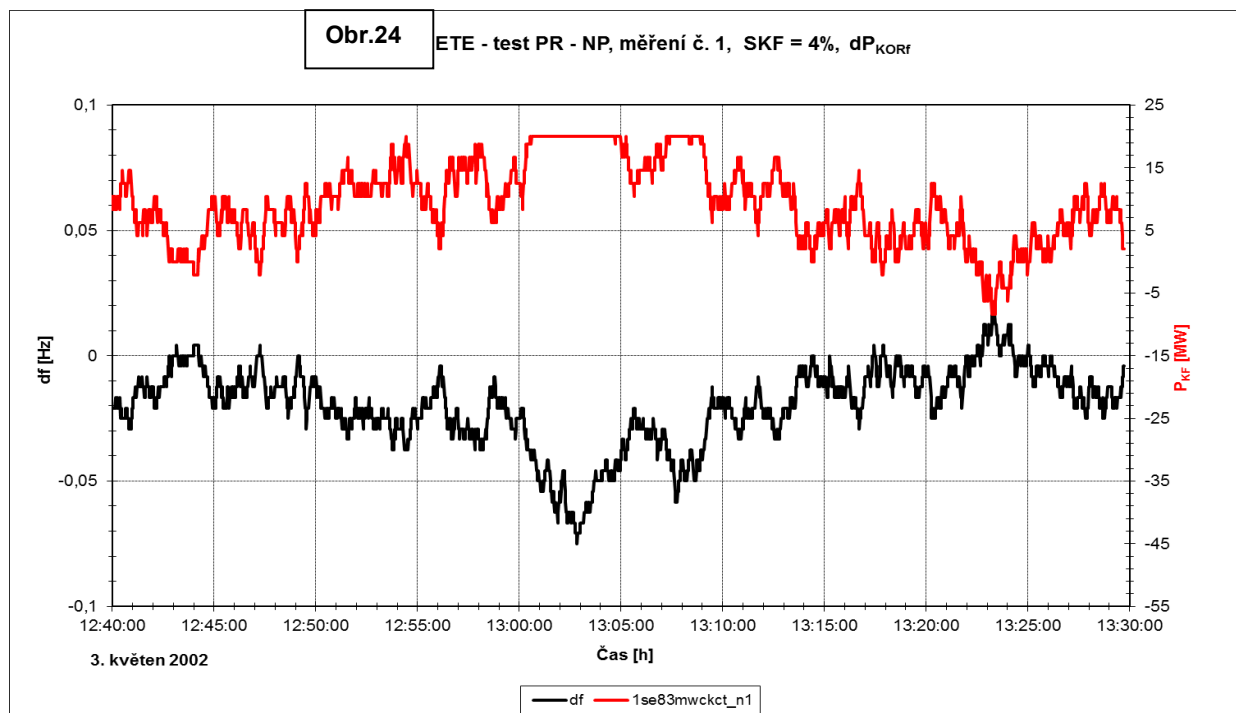
Změna tlaku v HPK o $\pm 0,15$ MPa vyvolá změnu střední teploty o $\pm 1,56$ K, změna tlaku v HPK $\pm 0,1$ MPa vyvolá změnu střední teploty $\pm 1,07$ K. Tato změna střední teploty vyvolá maximální změnu hladiny v KO cca ± 17 cm. Naším cílem je, aby během přechodových procesů při odchylkách frekvence nezapínaly a nevypínaly elektrické ohříváky KO, neotvíraly vstříky a nedocházelo k doplňování resp. odpouštění chladiva z primárního okruhu. K dispozici je tedy relativně omezený rozsah necitlivosti i pro regulátor tlaku v I.O. a hladiny v KO. Je však možné nastavit pro regulátor hladiny v KO a tlaku v I.O. vhodnou necitlivost.

Turbogenerátor je v režimu regulace elektrického výkonu se zapojeným korektorem frekvence (zkoušky byly prováděny provedeny se statikou 4 a 8% tj. s vlivností ± 500 MWel/Hz, resp 250 MWel/Hz (pro statiku 8%) a meze ± 20 MWel pro obě varianty. Statika / vlivnost, nominální frekvence i meze jsou přestavitelné,

Reaktor je v režimu ručního ovládání, nebo v režimu regulace tlaku v HPK (P_R) s rozšířenou necitlivostí = mrtvým pásmem. Takovýto režim ponechá regulaci reaktoru možnost zasáhnout teprve tehdy, dojde-li ke změnám tlaku v HPK za přípustné hranice.

Na obrázku 24 je reakce elektrického výkonu generátoru (horní křivka) v závislosti na měnící se frekvenci – dolní, černá křivka ukazuje odchylku od 50HZ. Na záznamu výkonu je patrné dosažení meze korektoru +20 MW při snížení frekvence o více než 0,04 Hz (TG o více než -2,4 ot/min).

Obr.24 Změny frekvence v síti (otáček TG) a odpovídající změny výkonu zadaného korektorem frekvence



Poznámka: Diskuse změn ostatních parametrů je uvedena v kapitole 6.

5. REAKTOR V REŽIMU RUČNÍHO OVLÁDÁNÍ, NEBO V REGULACI TLAKU V HPK S ROZŠÍŘENOU NECITLIVOSTÍ

Aby bylo možné využívat samoregulačních vlastností reaktoru, musí být reaktor v režimu ručního ovládání, nebo v režimu P_R s nastavenou dostatečnou necitlivostí, která umožní změny tlaku v HPK bez toho, aby automatický regulátor reaktoru zasahoval do procesu. V obou takových režimech bude výkon reagovat na změny parametrů v PG v samoregulaci

Samoregulační vlastnost, jak bylo ukázáno, se během kampaně mění v závislosti na vyhoření, takže i chování bloku se bude v čase měnit.

Během snižování (zvyšování) teploty I.O. a II.O. dochází k uvolňování (pohlcování) tepelné práce ve vodě a konstrukčních prvcích I. a II. O. Kromě samoregulačních schopností je tedy k dispozici tepelná energie naakumulovaná v primárním a sekundárním okruhu (ve vodě i zařízení), která je uvolňována prakticky okamžitě. Teprve při jejím „odčerpávání“ (při zvýšení výkonu TG), resp. „akumulaci“ (při snížení výkonu TG) mají možnost se projevit zpětnovazební samoregulační změny výkonu reaktoru.

Během snižování (zvyšování) teploty I.O. (II.O.) dochází k uvolňování (pohlcování) tepelné práce ve vodě a konstrukčních prvcích I. a II. O.

Celkový tepelný příkon v páře postupující na TG je během změn teplot dán:

$$N_{tep} = N_R + \Delta N_{akum} + \Delta N_R \quad (38)$$

kde

$$\Delta N_R = -\kappa_t \cdot \Delta \bar{t}_{I.O.}$$

je výkon uvolněný zpětnovazebními procesy reaktivity.

Výkon N_{akum} (resp. ΔN_{akum}) uvolňovaný /pohlcovaný při změně teploty :

$$N_{akum} = -\frac{\partial t_{I.O.}}{\partial \tau} \times c_p \times G_{I.O.} - \frac{\partial t_{II.O.}}{\partial \tau} \times c_p \times G_{II.O.} \quad (39)$$

kde (zanedbáme-li v prvním přiblížení akumulaci v konstrukcích – odtud se energie uvolňuje pomaleji) :

$$G_{I.O.} = 240\,000 \text{ kg vody}$$

$G_{II.O.} = 312\,000$ kg kotlové vody

$$\frac{\partial t_{I.O.}}{\partial \tau}, \frac{\partial t_{II.O.}}{\partial \tau} \quad \text{časová změna teploty vody I. resp. II. okruhu}$$

Na počátku děje, bude-li změna teploty pomalá (než se uplatní samoregulace reaktoru):

$$\frac{\partial t_{I.O.}}{\partial \tau} \sim \frac{\partial t_{II.O.}}{\partial \tau} \quad (40)$$

lze psát

$$\Delta N_{akum} \doteq - \frac{\partial t_{I.O.}}{\partial \tau} \times c_p [G_{I.O.} + G_{II.O.}] \quad (41)$$

kde pro $G_{I.O.} + G_{II.O.} = 552$ [t] a pro $c_p = 5,3 \cdot 10^6$ [J/K.t¹] = $c_p \cdot (G_{I.O.} + G_{II.O.}) = 2925$ [MWs/K]

$$\Delta N_{akum} = -2925 \cdot \partial t_{I.O.} / \partial \tau \quad [\text{MW}] \quad (42)$$

a tedy celková změna tepelného výkonu bude

$$\Delta N_{tep} = 2925 \cdot \partial t_{I.O.} / \partial \tau + \Delta N_R \quad [\text{MW}] \quad (43)$$

Po ustálení, kdy $\frac{\partial t_{I.O.}}{\partial \tau} = 0$ je $\Delta N_{akum} = 0 \rightarrow \Delta N_{tep} = \Delta N_R$,

Poznámka:

- ΔN_R pro 2.v.sázku 1.bloku ETE bylo 24 až 45MWt/K, tj. 0,8 až 1,5% N_{nom} /K
- ΔN_R pro 14.v.sázku 1.bloku ETE bylo 47 až 62MWt/K, tj. 1,6 až 2,1% N_{nom} /K

Budeme-li předpokládat, že $\Delta t_{I.O.}^{-max} = -1,0K$ bude dosaženo během 10 sekund, bude $\Delta N_{tep} = 7,68\%N_{nom}$, vidíme, že role tepelné setrvačnosti bude hrát, roli podstatnou před uplatněním samoregulačních schopností reaktoru. Problém je v její krátkodobosti – působí pouze po dobu změny teploty.

Při zapnutí korektoru frekvence se statikou „s = 4%=0,04, tj. $\Delta N_E = 20\text{MWel}$ při snížení frekvence na 50-0,04=49,96Hz je vlivnost $KOR_f v = 500\text{MWel/Hz}$. bude při změně frekvence v síti Δf odpovídající změna elektrického výkonu (pro nominální $f = 50\text{Hz}$ a $N_{Enom} = 1000\text{MWel}$)

$$\Delta N_E = 500 \cdot \Delta f \quad [\text{MWel}] \quad (44)$$

a tedy požadavek na změnu tepelného příkonu do TG s dobrým přiblížením pro 33% účinnost v blízkosti nominálního výkonu ($3 \times 500 \times 0,875 = 1312 \text{ MWt}$)

$$\Delta N_{\text{tep}} = -3 \times 500 \times 0,875 \cdot \Delta f = -1312 \times \Delta f \quad [\text{MWt}] \quad (45)$$

tj. při dlouhodobé změně frekvence $-0,04 \text{ Hz}$ by se měl zvýšit tepelný výkon reaktoru o $+52,5 \text{ MWt}$. Z uvedeného výpočtu je zřejmé, proč u prvních vsázek paliva nebyl samoregulační proces příliš úspěšný (nízké κ_t)

Poznámka:

Bylo by příjemné, aby tento výkon byl z akumulace tepla plynule nahrazován změnou tepelného výkonu reaktoru, tj. aby součet uvolňované/pohlčované akumulované energie a nástup vlivu zpětnovazebních efektů byl v každém okamžiku konstantní, tj. žádoucí podmínka by byla:

$$\Delta N_{\text{akum}}(T) + \Delta N_R(T) = \text{konst.} \quad \text{V daném případě} = +52,5 \text{ MWt} \quad (46)$$

To je ale podmínka v praxi nereálná, protože změna tlaku v HPK a tím i teploty v soustavě by musela probíhat pomalu. Bude-li změna teploty I.O. pomalá, bude reakce soustavy aperiodická a dojde k ustálení výkonu na nové vyšší/nížší hodnotě v závislosti na snížení/zvýšení teploty I.O.

Prvotní skok ale bude spíše vysoký (porucha v síti) a může být uspokojen z tepelné akumulace (tepelné setrvačnosti) soustavy. V takovém případě bude ustálená změna na nižším tlaku v HPK, než změna počáteční. Díky setrvačnosti soustavy tedy může rychlá změna tlaku v HPK (tedy i teploty I.O.) vést i k přeregulování.

Bude-li např. počáteční skok $\Delta N_E = 20 \text{ MWel}$ a proběhne-li za 1 sekundu (tj. 4% za sekundu), bude $\Delta N_t = 52,5 \text{ MWt/s} = 1,73 \% N_{\text{nom}}/\text{s}$, což je změna zvládnutelná z akumulace tepla. Záleží pak jen na stavu zpětných vazeb, jak bude probíhat následující přechodový proces.

κ_t je závislá na stupni vyhoření vsázky. Tepelnou setrvačnost soustavy nelze ovlivnit, je během kampaně stálá. Proto bude proces v průběhu kampaně ovlivňován pouze stupněm vyhoření. Z okamžitého hlediska lze vyhoření zanedbat a κ_t považovat za konstantu.

Pokud je pro režim samoregulace používána regulace reaktoru v HPK („P_R“) s rozšířenou necitlivostí, je vhodné, aby byla vyblokována funkce zvyšující výkon reaktoru v případě většího poklesu tlaku v HPK a ponechána pouze funkce na snížení výkonu reaktoru pro případ převýšení tlaku nad nastavenou horní mez. Dolní mez je vhodné ponechat pouze na signalizaci operátorovi.

6. SHRUTÍ KAPITOL 2 AŽ 4

V předcházejících kapitolách byly diskutovány vlivy, které se větším, či menším podílem účastní při procesech bloku, přispívajících ke stabilitě frekvence v síti. Obvykle ne všechny tyto procesy nazýváme samoregulačními, i když, jak ukazuje rozbor, samoregulační vliv mají.

Byly diskutovány vlivy :

❖ Mechanické

- setrvačnost turboalternátoru,
- tření v ložiscích turboalternátoru
- ventilační ztráty

Vliv setrvačnosti TG je patrný při ustáleném provozu TG v režimu ručního ovládání, v režimu regulace elektrického výkonu bez i s korektorem frekvence, ale i v režimu regulace TG na konstantní tlak v HPK, kdy jsou vidět změny elektrického zatížení jako následek fluktuace frekvence. Při takové fluktuaci lze podle provedeného rozboru očekávat u TG 1000 MW změny výkonu většinou v mezích $\pm 1,5$ MWel, tj. 0,15%.

❖ Termodynamické

- akumulace tepla v soustavě a jeho uvolňování

U bloku s VVER 1000 se při $\Delta p_s = - 0,1$ MPa se celkově uvolní tepelná energie cca 1850 MJ pouze z kotlové vody a se zpožděním z akumulace ve vodě primáru a palivu dalších až 2440 MJ nezávisle na tom, jak rychle se naakumulované teplo uvolní. Uvolněná / pohlcená práce poskytne rovněž čas ke změně neutronového výkonu reaktoru (uvolňování teplotního efektu reaktivity).

❖ Jaderně –fyzikální

- využívání teplotního a výkonového efektu reaktivity reaktoru
 - Samoregulační schopnosti aktivní zóny vzrůstá se snižováním koncentrace H_3BO_3 , která se snižuje úměrně vyhoření. V počátečním období po překládce paliva je u některých aktivních zón využívání samoregulace s korektorem frekvence na mezi možností. Samoregulaci pro PR je proto vhodné zapojit až teprve tehdy, když κ_t vzroste nad ~ 60 MWt / K.
 - Samoregulační schopnost roste rovněž se vzrůstem střední teploty chladiva, takže pokročilejší projekty s vyššími parametry sekundárního (a proto i primárního) okruhu mají větší naději na uplatnění při primární regulaci frekvence a předávaného výkonu.
 - V oblasti okolo $\sim 6,3$ MPa odpovídá přibližně $1\text{ K} \sim 0,1\text{ MPa}$, takže $\kappa_t \sim 0,1 \cdot \kappa_p$. Budeme-li tedy využívat samoregulaci v mezích $\Delta p = 0,1\text{ MPa}$ (tj. $\pm 0,05\text{ MPa}$), bude se kolísat střední teplota primárního okruhu v mezích $\Delta t = 1\text{ K}$, a úměrně při $\Delta p = 0,15\text{ MPa}$ (tj. $\pm 0,075\text{ MPa}$), bude se kolísat střední teplota primárního okruhu v mezích $\Delta t = 1,5\text{ K}$, To by měly být hodnoty určující pro analýzu nastavení regulátorů pro minimalizaci jejich nežádoucích zásahů.

- κ_p pro vsázky 12 až 14 je v mezích 750 až 1180, takže $dp_{PG} = (1,333 \text{ až } 0,847) \cdot df$. Při změně frekvence 0,0833 Hz by změna tlaku v PG byla 0,111 až 0,070 MPa, což jsou hodnoty teplofyzikálně přijatelné.
- Provozování TG ETE je pro účely využívání samoregulace bloku s výhodou možné pro rovnovážné vsázky, jak ukazují hodnoty pro 12. až 14 cyklus.

❖ **Teplotní roztažnost moderátoru:** při změnách střední teploty moderátoru v primárním okruhu dojde ke změně výšky hladiny v kompenzátoru objemu (KO) o $\sim 0,1 \text{ m} / \text{K}$ a tím i změnu tlaku v primárním okruhu.

- Změna tlaku páry v HPK v mezích 0,1 MPa vyvolá změnu střední teploty moderátoru v mezích 1,07K. Tato změna střední teploty vyvolá změnu hladiny v KO cca 17 cm.
- Změna hladiny vyvolává působení regulátoru hladiny (doplňování či odpouštění moderátoru),
- změna tlaku v primárním okruhu vyvolává působení regulátoru tlaku: působení vstříků do KO při zvýšení tlaku, zapínání EOKO v případě snížení tlaku v I.O.

Doporučení

1. Pro účel využívání samoregulace pro primární regulaci frekvence a předávaného výkonu je vhodné využívat jaderné bloky u nichž je $\kappa_t \geq 60 \text{ MWt/K}$, chceme-li změnu elektrického výkonu 20MWel..
2. Bude-li v provozu více jaderných bloků, zařazovat do režimu PR bloky, jejichž $\kappa_t > 60 \text{ MWt/K}$, tj. nikoli na počátku kampaně, kdy se samoregulace reaktoru ještě nerozvinula.
3. Pro účely samoregulace je vhodné nastavit necitlivost regulátorů hladiny v KO i tlaku v primárním okruhu tak, aby výše uvedené regulátory nevstupovaly do činnosti během samoregulačních procesů.
4. Pokud je pro režim samoregulace používána regulace reaktoru na konstantní tlak v HPK („PR“) s rozšířenou necitlivostí, je vhodné, aby byla vyblokována funkce zvyšující automaticky výkon reaktoru v případě většího poklesu tlaku v HPK. Ponechána by měla být pouze funkce snížení výkonu reaktoru v případě převýšení tlaku nad nastavenou horní mez. Jde o bezpečnostní požadavek. Dolní mez je vhodné ponechat pouze na signalizaci operátorovi.

Tyto vlivy mohou mít různou roli a velikost podle toho, v jakém režimu ovládání se nachází reaktor a turboalternátor.

Vzhledem k tomu, že uvedené efekty probíhají ve velké většině současně, není vždy snadné je při pozorování od sebe oddělit.

7. DISKUSE K VÝSLEDKŮM ZKOUŠEK PRIMÁRNÍ REGULACE ETE

Během energetického spouštění (ES) ETE byly na 1. a 2. bloku prováděny zkoušky primární, sekundární a terciální regulace podle programů 1E048/OP/01 a 2E048/R0.

Podle Souhrnné zprávy o zkouškách realizovaných v rámci ES na 1.bloku (ICE/10619/TR/48/0213/Rev.0 z 11.9.2002) byly provedeny následovné zkoušky PR:

Tab 5 Přehled testů PR u ETE 1

Č.	Test	Výchozí N_R	Režim regulátoru reaktoru	KORf	Výstup z KORf	$\pm 5\text{ot}/\text{min}$	Poznámka
1	PR - Δf	100%	P_R	8%		6x	Při 5.simul. zvýšení otáček regulátor zasunul 10 skupinu RO o jeden krok
2	PR - Δf	100%	T_R	8%		4x	Při 2.simul. snížení otáček regulátor vysunul 10 skupinu RO o jeden krok
3	PR - NP	98%	P_R	8%	-2,1 až +16,7MW	-	Bez pohybu RO
4	PR - NP	98%	P_R	4%	-8,3 až +20,0MW	-	Bez pohybu RO
5	PR - Δf	80%	P_R	8%		2x	Bez pohybu RO
6	PR - NP	80%	P_R	4%	0,0 až +20,0MW	-	Bez pohybu RO
7	PR - Δf	70%	P_R	8%		2x	Bez pohybu RO
8	PR - NP	60%	P_R	4%	-11 až +20,0MW	-	RO o 3 kroky dolů po nadávkování čistého kondenzátu před koncem zkoušky

Poznámka: Statika KORf bývá nastavena v normálním provozu na 4% - viz obr 13. Statika pro bloky o činném výkonu do 300 MW včetně, bývá nejčastěji 8 %.

Při ES a ZP na 2.bloku byly podle Závěrečné zprávy (ICE/10660/TD/2E048/0311/Rev.0 z 08/2003) provedeny zkoušky PR se stejným zadáním avšak na zóně s o něco menším vyhořením. Proto také bylo více testů provázeno zásahem RO, neboť samoregulační vlastnosti této zóny byly menší. Výsledky testů druhého bloku ETE jsou v této práci uváděny pouze pro statiku $s=4\%$. Měření na druhém bloku nebyla také prováděna ve stejném rozsahu, jako na bloku č. 1. Proto uváděné výsledky nejsou s 1.blokem plně souměřitelné.

Tab. 6 Přehled testů PR u ETE 2

Č.	Test	Výchozí N_R	Regulátor reaktoru	KORf	Výstup z KORf	$\pm 5\text{ot}/\text{min}$	Poznámka
1	PR - Δf	100%	P_R	8%			Při simul. změny otáček regulátor R vysunul 10 skupinu RO o 7 kroků
2	PR - Δf	100%	T_R	8%			Při simul. změny otáček regulátor R vysunul 10 skupinu RO o 7 kroků
3	PR - NP	100%	P_R	8%			Bez pohybu RO
4	PR - NP	100%	P_R	4%			Bez pohybu RO
5	PR - Δf	80%	P_R	8%			Při simul. změny otáček regulátor R zasunul 10 skupinu RO o 4 kroky
6	PR - NP	80%	P_R	4%			Bez pohybu RO
7	PR - Δf	60%	P_R	8%			Při simul. změny otáček regulátor R vysunul 10 skupinu RO o 5 kroků
8	PR - NP	60%	P_R	4%			Při simul. změny otáček regulátor R vysunul 10 skupinu RO o 4 kroky

Měření při zkouškách Δf (č. 1, 2, 5, 7) byla prováděna opakovaným (po 15 až 20 minutách) simulovaným snížením a následně zvýšením otáček TG o 5 ot/min (tj.

o $\pm 0,0833\text{Hz}$), na které vždy zareagoval TG prostřednictvím KORf.

Tyto zkoušky posloužily zejména k otestování funkce obvodů regulátorů a korektoru frekvence. Takový režim se může uplatnit pouze při výpadcích větších bloků v soustavě, kdy dojde ke ztrátě rovnováhy mezi výrobou a spotřebou v síti. Příkladem může posloužit test č 1 na 1.bloku ETE (viz obr. 15 až 21). Tomu samozřejmě odpovídají i značné rozkmity dalších základních parametrů p_{HPK} (5,89 až 6,12MPa) i $t_{\text{I.O.}}$ (303,5 až 304,9°C), ale i důležitých parametrů závislých L_{KO} a p_{KO} , což způsobovalo potřebu častých zásahů regulátorů doplňování do I.O., zapínání elektroohříváků kompenzátoru objemu (EOKO) při potřebě zvýšit tlak v I.O., nebo i působení sprch do KO při potřebě snížit tlak v I.O.

Tyto testy však byly velmi poučné z hlediska možnosti studia jednotlivých složek samoregulace. Díky tomu, že se skutečné otáčky TG při simulaci neměnily, je vliv GD^2 zřetelný při ustálených režimech, ale z přechodových procesů je vyloučen. Na změnách výkonu TG a reaktoru se podílí pouze akumulace tepla a vliv teplotního a výkonového efektu reaktivity. I tak není snadné tyto vlivy od sebe při pozorování oddělit. Zkoušky PR-NP byly příkladem reálných režimů, které demonstrovaly chování bloku při reálných fluktuacích frekvence v ES, a tedy pro účely této práce vhodné. Proto budou blíže rozebírány testy 3,4,6,8 zmíněné v tabulkách 4.1 a 4.2.

Výše uvedené testy byly bezprostředně po provedení vyhodnocovány pouze z hlediska certifikace primární regulace frekvence, nikoli z hlediska rozboru přechodových procesů. Takový rozbor je předkládán v této kapitole.

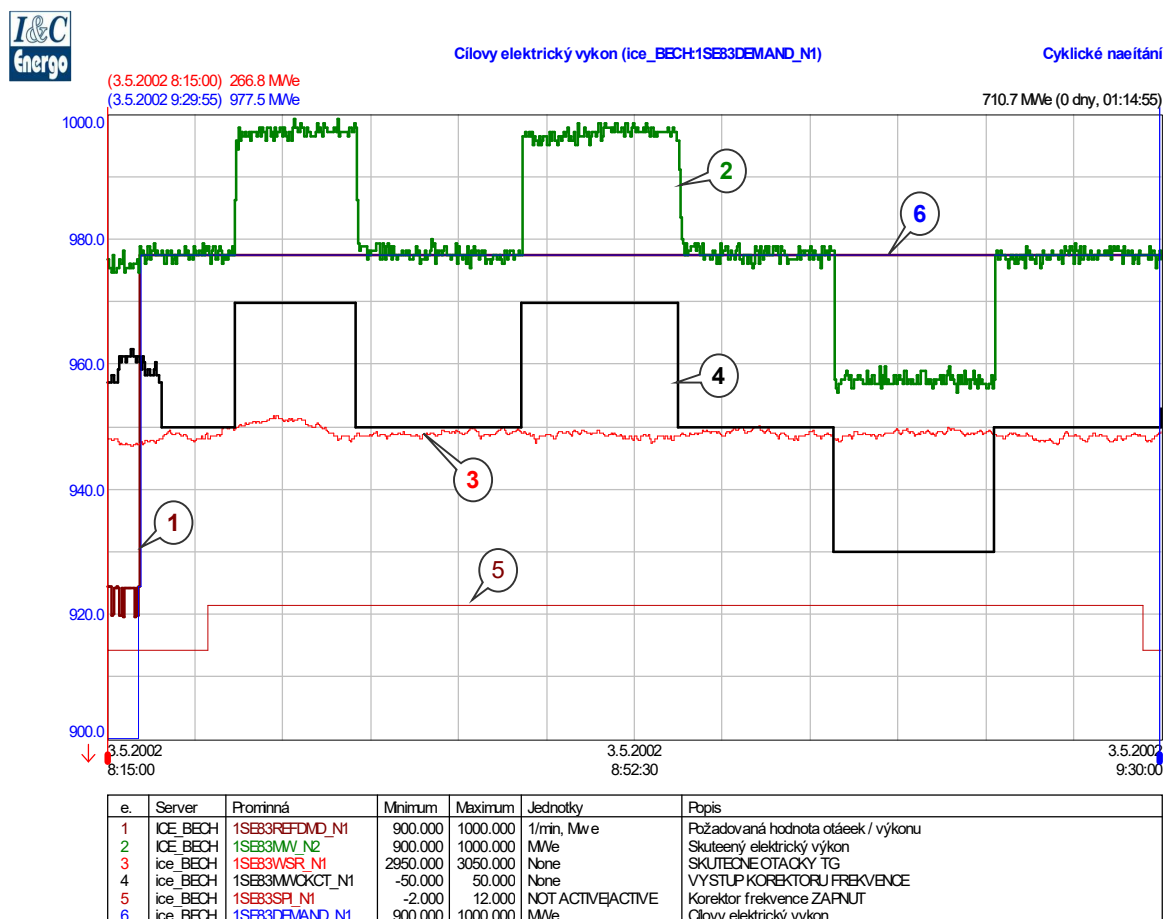
Všechny testy na obou blocích byly prováděny na čerstvých zónách prvních zavážek paliva, a jak vyplývá z předcházejících teoretických rozborů, bylo to v době, kdy samoregulační vlastnosti vyjádřené poměrem κ_t byly velmi nízké – okolo 25MWt/K, čili méně než poloviční, než hodnota žádoucí. Vzhledem k časově náročnému hledání řešení otázek spojených s regulačními ventily turbíny na 1.bloku ETE proběhla delší provozní doba před dosažením plného výkonu a prováděním testů primární regulace. Vyhoření zóny bylo větší a samoregulační vlastnosti proto o něco málo lepší než při testech PR na 2.bloku.

Reprezentativnějších výsledků by bylo dosaženo na konci prvního cyklu, nebo, ještě lépe, během dalších palivových cyklů.

7.1 ETE 1

7.1.1 Test primární regulace při simulaci změny otáček TG při výkonu blízském 100% N_{nom} statika KORf 8%

Obr.25: ETE1, test č. 1 – vzruchy simulací změny otáček TG ± 5 ot/min



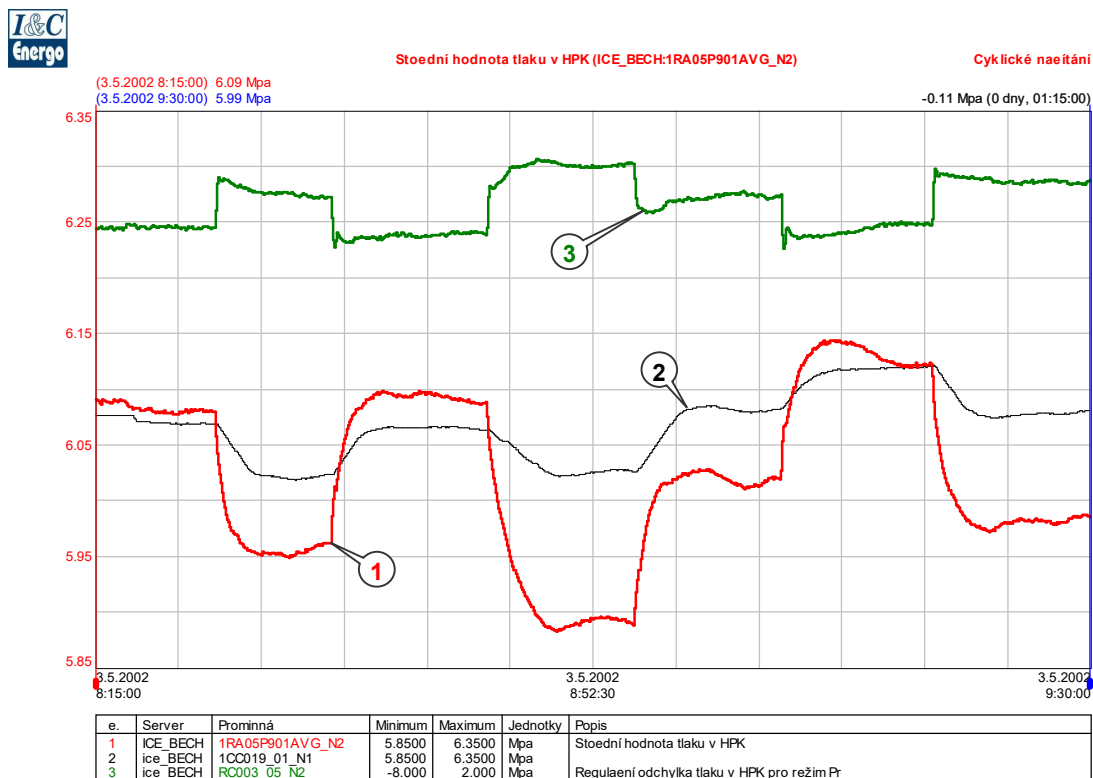
Na skokové vzruchy – imitace změn otáček TG o 5 ot/min (tj. o $\pm 0,0833$ Hz) – (křivka č. 4 ukazuje výstup korektoru frekvence)) reaguje TG skokovými změnami elektrického výkonu (horní zelená křivka č.2) v obr. 25. Zvlněná křivka výkonu (č.2) na vyšší i nižší úrovni skutečného výkonu demonstruje rychlé drobné změny frekvence, k nimž dochází za provozu průběžně vzhledem k náhodným změnám spotřeby a produkce v síti. Otáčky TG se v té době měnily mezi 2998 až 3002 min^{-1} (viz červený záznam č.3), tj. frekvence v síti mezi 49,967 až 50,033 Hz, což jsou poměrně obvyklé změny za ustáleného stavu. Při takovýchto změnách se uplatňuje zejména efekt od GD^2 , ale i funkce KORf, pokud je zapnutý.

Pozn.: Pro lepší vyhodnocení by bylo vhodné mít k dispozici měření frekvence včetně její derivace v čase) ze stejné doby, kdy probíhaly testy PR. To, že výstup KORf na obrázku č.20 nevykazuje žádné kmity je zřejmě dáno velmi nastavením stupnice. Stupnice by měla být nastavena od 49,95 do 50,05 Hz.

Imitaci skokových změn otáček odpovídají i relativně rychlé změny p_{HPK} , $t_{I.O.}$, N_R , ale i hladiny v KO apod. Na obr. 26 je detail reakce skutečného elektrického výkonu generátoru při první simulaci. Křivka č.1 ukazuje změnu středního tlaku v HPK, křivka č. 2 ukazuje změnu výstupu z koordinátoru řízení (Control Coordinator = CC) reaktoru, křivka 3 relativní odchylku tlaku v HPK pro režim P_R .

Na předcházejícím obrázku je vidět, jak se během testu měnila frekvence v síti podle otáček turboalternátoru. Největší změna je na počátku testu byla (2998 až 3002 ot/min – tj. $\Delta n = 4 \text{ ot./min} = 0,1333\%$), v dalších minutách testu byla zaznamenána změna prakticky v rámci $\pm 1 \text{ ot./min}$, tj. $0,033\%$. Změna frekvence v síti má podle výše uvedených úvah způsobit (při zapnutém KORf se statikou 4%) kolísání elektrického výkonu generátoru $\Delta N_{el} = 0,17\% / 4\% \times 1000 \text{ MW} = 33,3 (\pm 16,5) \text{ MW}_{el}$, resp. $17,5 \text{ MW}_{el}$ při $\pm 1 \text{ ot./min}$. Tyto hodnoty poměrně dobře odpovídají vypočítaným hodnotám.

Obr. 26. ETE 1, test 1. Odezva tlaku v HPK (červená křivka č. 1) na simulované změny otáček TG

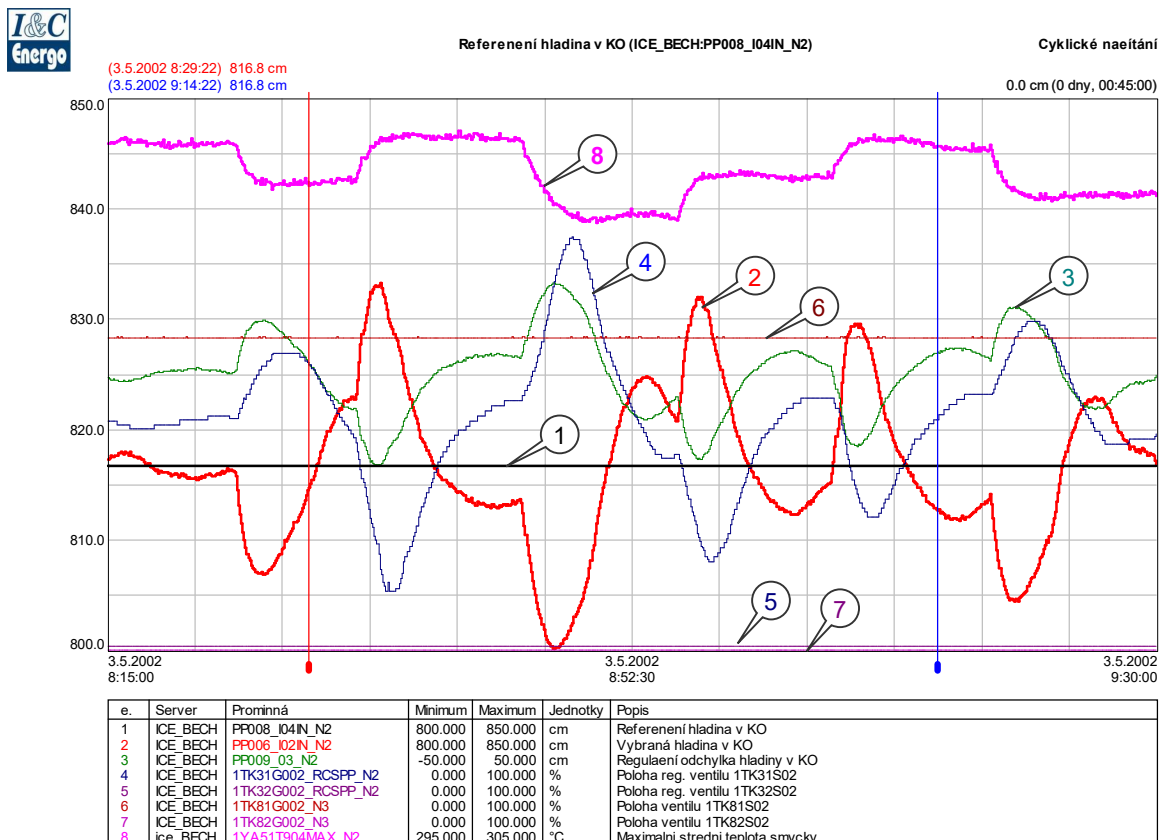


Změna zatížení TG vyvolá pootevření / přivření regulačních ventilů (RV) TG a pokles / nárůst tlaku v HPK a v PG. Maximální zaregistrovaný rozkmit Δp_{HPK} v tomto testu je $\sim 0,27 \text{ MPa}$. Tím dochází ke změně teploty varu kotlové vody v PG, následně i v I.O. (fialová křivka č. 8 na obr.27).

Změna tlaku páry (křivka č. 1 na obr. 26) nekopíruje skokové změny výkonu, změny jsou pozvolnější, protože se uplatňuje vliv uvolňování naakumulovaného tepla při snížení tlaku, a naopak akumulace tepla při zvýšení tlaku páry v HPK. Tento efekt je patrný i na změně teploty (fialová křivka č. 8 na obr.27) i na následné změně výkonu reaktoru vyvolaném teplotním efektem reaktivity (červená křivka v obrázku č. 23). Po prvním vzruchu

došlo ke snížení tlaku páry v HPK o cca 0,14 MPa, následně – po druhém vzruchu - k jeho nárůstu o 0,15MPa, po třetím vzruchu ke snížení tlaku páry o 0,2MPa. Čtvrtý vzruch byl návratem zadaných otáček na výchozí hodnotu, avšak parametry jsou rozkývány tak, že p_{HPK} se na výchozí hodnotu nevrací a zůstává cca 0,1MPa pod výchozí hodnotou.

Obr. 27 ETE 1, Test č. 1. Odezva střední teploty I.O. (křivka č. 8) na změny tlaku v HPK a rozkývání parametrů KO



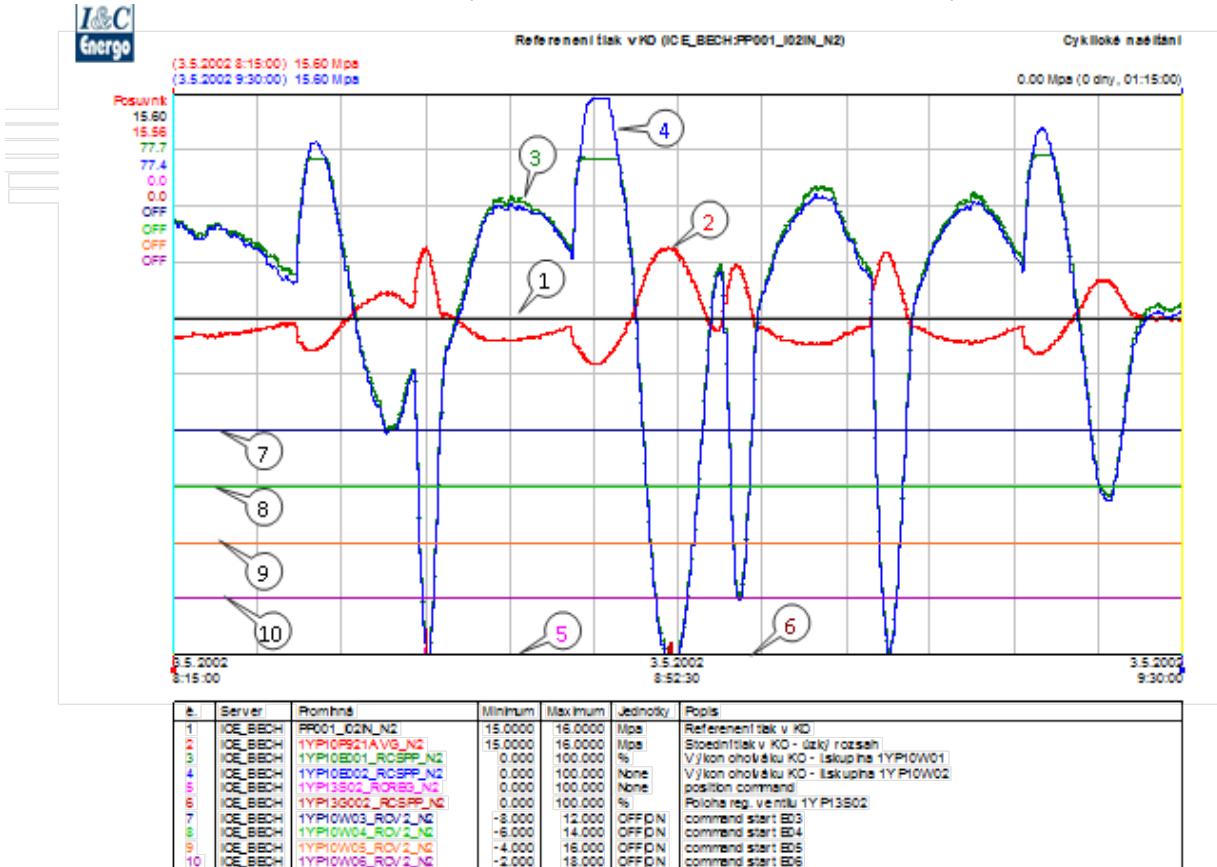
Obrázek č.27 ukazuje změnu střední teploty primárního chladiva (křivka č. 8) s maximálním rozkmitem $\Delta t_{i.o.} \sim 1,6$ K, Křivka č. 2 vykazuje rozkmit $\Delta h \sim 33$ cm.

V první vlně je registrován pokles teploty smyčky o cca 0,45K a ve stejné době dochází ke snížení hladiny v KO o cca 7 cm. Z rozboru vlivu hladiny (viz kapitolu 2.4) vyplynulo, že vliv roztažnosti vody je cca 17 cm/K, takže při změně teploty 0,45 K by teoretická změna hladiny měla být o 7,65 cm. To je poměrně dobrá shoda. Pro další měření je záhodno provést měření změny hladiny v závislosti na teplotě a z toho určit lepší vstupní data.

Z obrázku je patrná i nepřilíš žádoucí reakce regulačních ventilů systému doplňování, reagujících na změny hladiny v KO. Proto druhá a další vlna průběhu děje není věrohodná. Na grafech zaznamenávána poloha regulačních ventilů, nikoli průtok doplňování či odpouštění. Zásahem regulace hladiny v KO a tlaku v primárním okruhu je téměř znemožněno porovnání s výpočty. Obr. 27 ukazuje na nesprávnou funkci regulátoru hladiny, neboť zadaná hodnota hladiny není korigována podle střední teploty primárního chladiva.

Následující obr. 28 zaznamenává střední tlak v KO s rozkmitem $\Delta p_{KO} \sim 0,21$ MPa a práci elektroohříváků KO při snížení tlaku. Při těchto testech nebyla ještě žádaná hodnota hladiny v KO korigována v závislosti na teplotě primárního chladiwa.

Obr. 28. ETE 1, Test 1. Odezvy tlaku chladiwa v I.O. na změnu střední teploty, funkce vstříků a EOKO

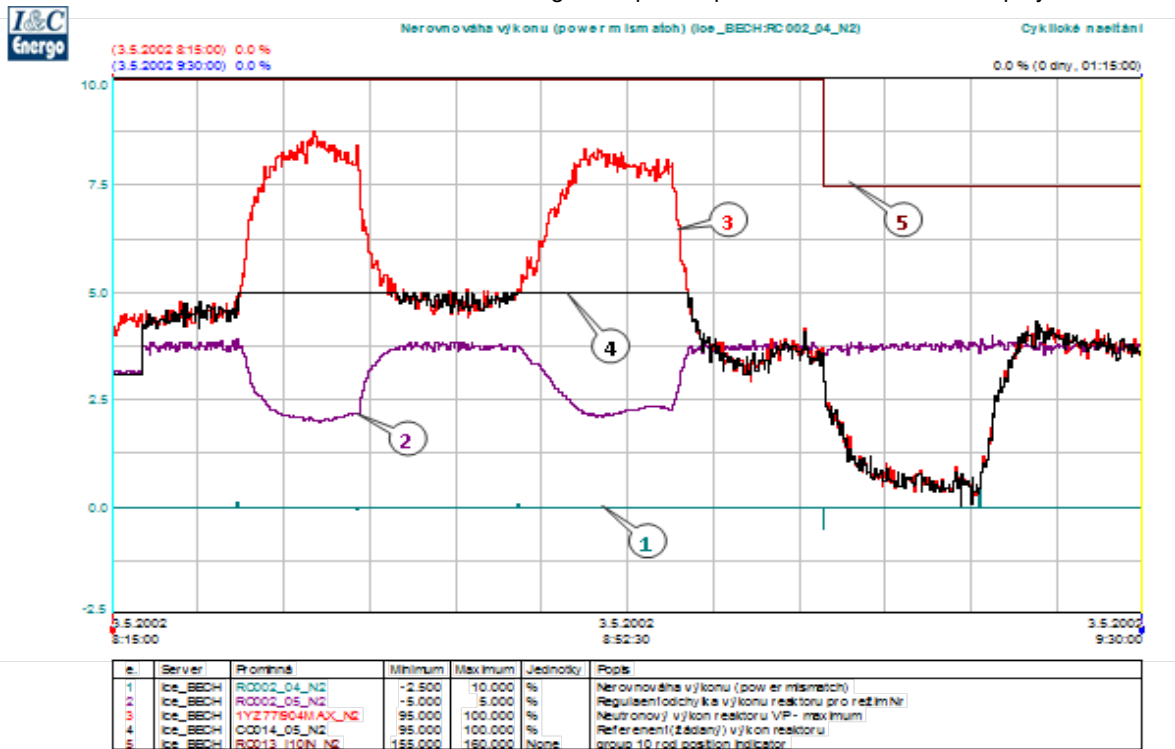


To, že tlak v HPK → teplota primárního chladiwa → výkon reaktoru reagují na skokový vzruch pomaleji je dáno vlivem uvolňováním naakumulovaného tepla a následně jeho pohlcováním – akumulací.

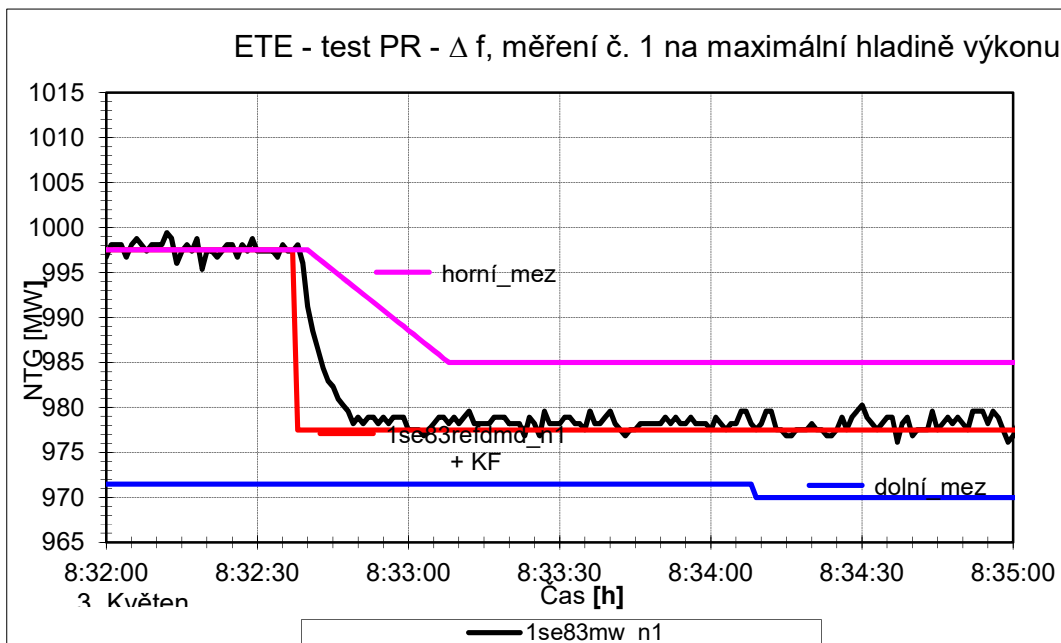
Na obr. 29 - fialová linie č.5 – je zaznamenána změna polohy RO v čase 9.07, protože byly testem rozkývané parametry. To je patrné např. i na rozkývání hladiny v KO (červená křivka č. 2 na obr. 28. Tím byl test do jisté míry „znehodnocen“. Příčina je ale logická: v době provádění testu měla aktivní zóna nízkou hodnotu κ_t (kappa).

To je ale průvodní znak všech testů prováděných na bloku 1 a 2 na prvních zavážkách paliva v době jejich nízkého vyhoření.

Obr. č. 29 ETE 1 Test 1. Neutronový výkon reaguje na změnu střední teploty moderátoru. Cca v 9:06:30 samoregulační proces přerušen zasunutím 10.skupiny RO o 1 krok



Obr. 30. ETE 1, Změna elektrického výkonu (detail) v reakci na simulaci zvýšení otáček TG

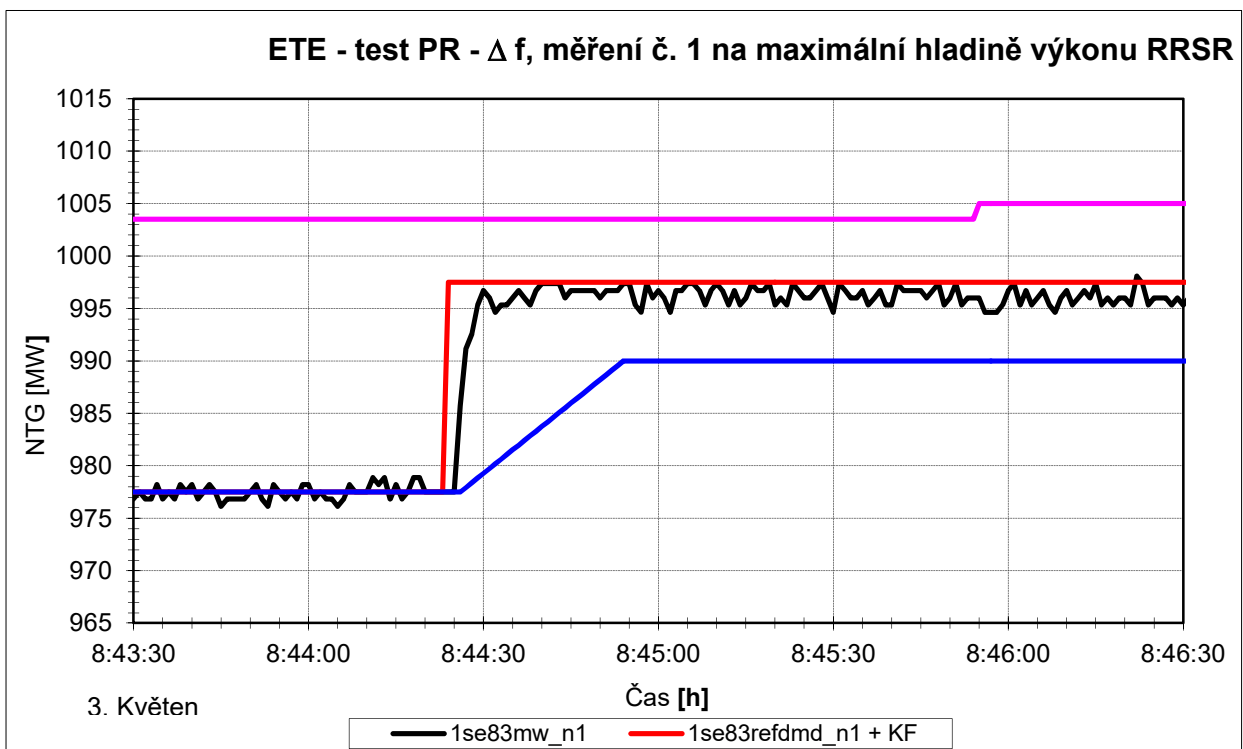


Černá křivka v obrázku 30 ukazuje pokles elektrického výkonu po simulaci změny otáček.

Černá křivka v obrázku 31 ukazuje náběh elektrického výkonu po prvních simulacích změny otáček TG. Náběh výkonu proběhl během 5 sekund, pokles při dalším testu během 8 sekund. Vliv GD^2 se v tomto případě, jak už bylo řečeno, uplatňuje jen jako důsledek změny frekvence v síti (zvlnění před i po simulaci, ale neuplatní se provedenou simulací, protože skutečné otáčky (tj. frekvence v síti) se simulovaným vzruchem během testu nemění. Proto rozdíl, mezi skutečným výkonem TG (tj. ekvivalentem tepelného výkonu zpracovávaného v TG) a neutronovým výkonem reaktoru musí být vliv akumulace tepla.

Kolísání výkonu $\pm 1,75$ MW odpovídá, podle ocenění vlivu GD^2 z kapitoly 2.1 změnám frekvence v síti v mezích $\frac{df}{dt} = \pm 1,75 \text{ MW} / 39,77 = \pm 0,044 \text{ Hz}$.

Obr. 31 ETE 1, Změna elektrického výkonu (detail) v reakci na simulaci snížení otáček TG



Měřený tlak a hladinu v KO nelze v tomto případě porovnat s výpočtem z důvodu interference regulátoru hladiny a tlaku. Poslední krok byl navíc postižen zasunutím absorpční skupiny tyčí a z vyhodnocení samoregulace je jej nutné vyloučit.

7.1.2 Test primární regulace v normálním provozu (NP) při výkonu blízkém 100% N_{nom} , statika KORf 8%

Obr. 32: ETE 1, Test 3, NP. Otáčky TG (3), výstup z KORf (4) a elektrický výkon TG (2),



Obr. 32 ukazuje reakci bloku při normálním provozu se zapnutým korektorem frekvence na počátku testu. Korektor frekvence, jak je patrné, zesiluje vliv změn otáček. Otáčky se mění od 2997 do 3000 min^{-1} , výkon od 965 do 980 MWel. Elektrický výkon věrně kopíruje výstup z korektoru frekvence.

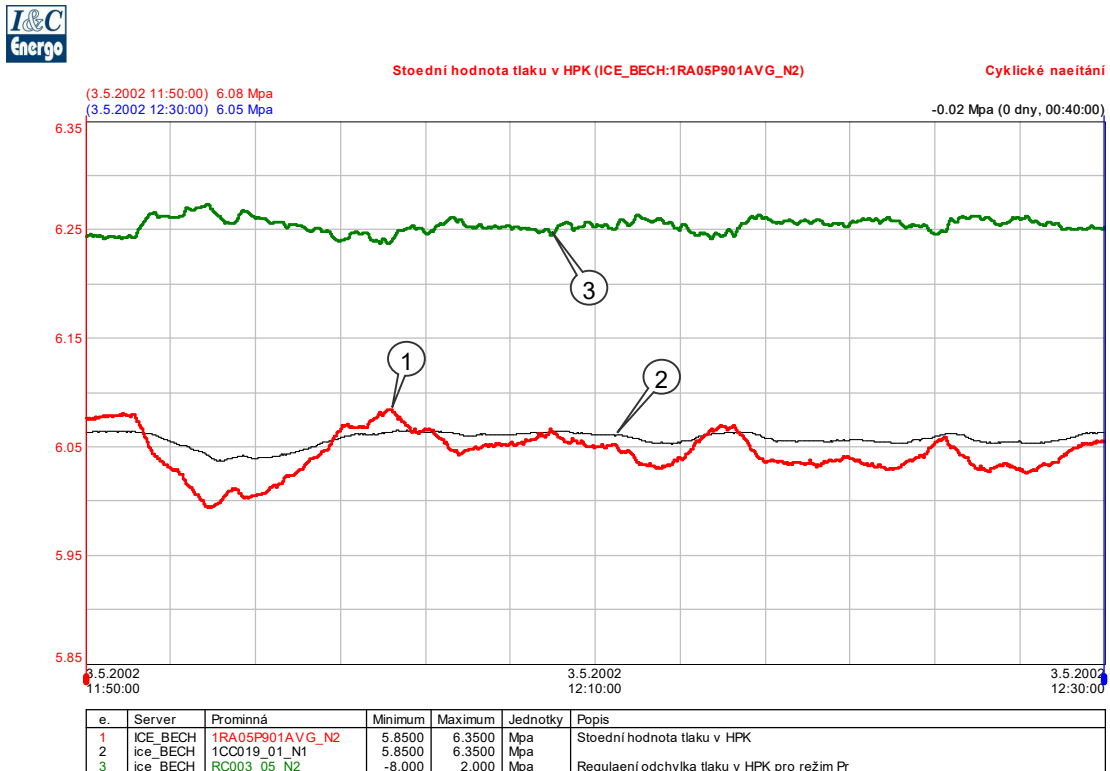
Poznámka: Kývání výkonu je ale patrné před zapnutím, ale i po vypnutí korektoru frekvence. Jde o efekt, který je spojen s vlivem mechanické setrvačnosti rotoru TG (GD^2), jak už bylo dříve popsáno.

Na obr. 33 je patrná změna p_{HPK} v rozsahu 5,97 až 6,075 MPa (červená křivka č. 1) – rozdíl tlaků 0,105 MPa. Výkon neutronového reaktoru (obr. 34) se pohybuje mezi 98,0 až 98,7 % nominálního výkonu.

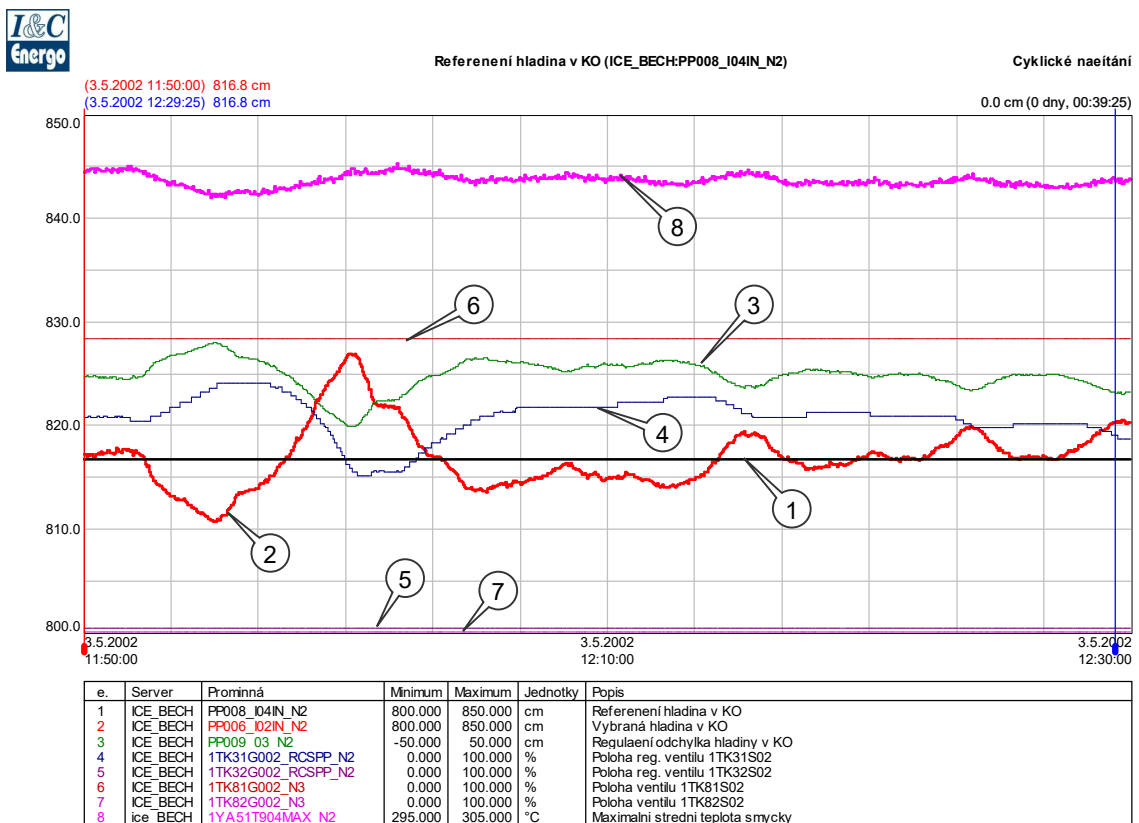
Měřená střední teplota smyčky (obr. 34) se pohybovala mezi 303,4 až 304 °C, tedy změna 0,6K.

Z uvedených měření vyplývá, že κ_t pro uvedený test bylo 35 MWt/K. (tj. $0,7 \times 3000 : 0,6$), což poměrně dobře odpovídá teoretickému rozboru.

Obr. 33 ETE 1, test 3 : tlak v HPK (červená linie) jako výsledek změn elektrického výkonu TG

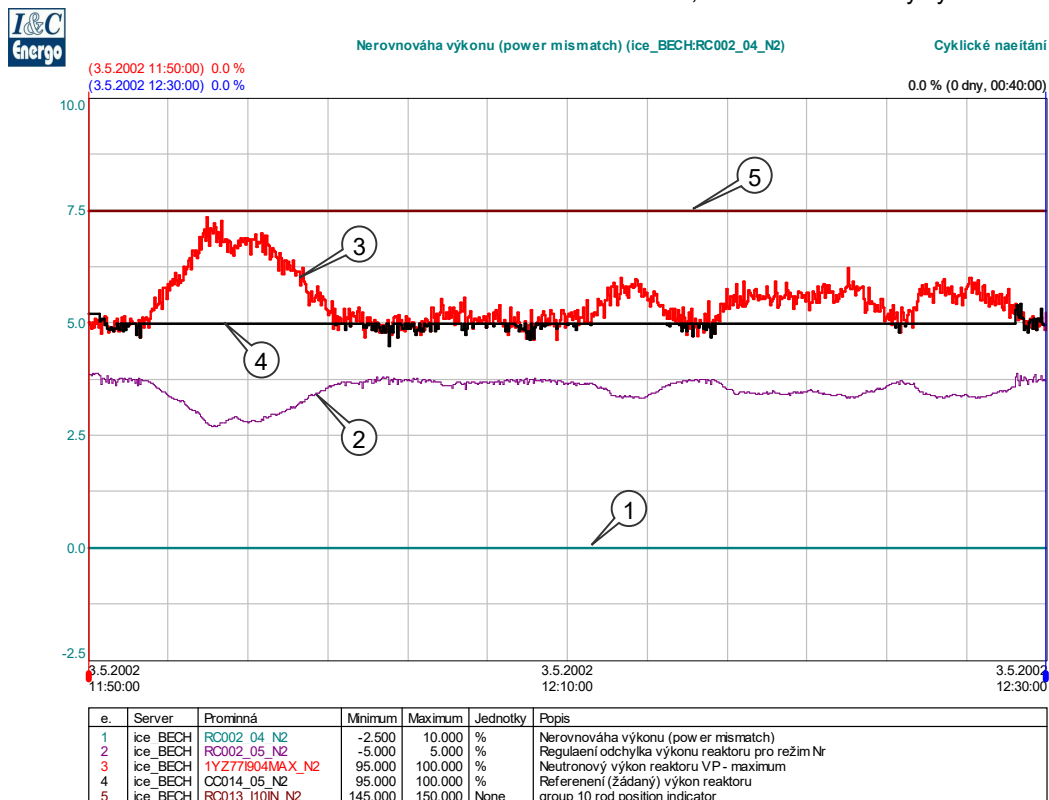


Obr. 34. ETE 1, test č. 3: střední teplota smyčky



Obr. 34 rovněž ukazuje na nevhodnou reakci regulátorů KO

Obr. 35 ETE 1, test č.3: Neutronový výkon reaktoru

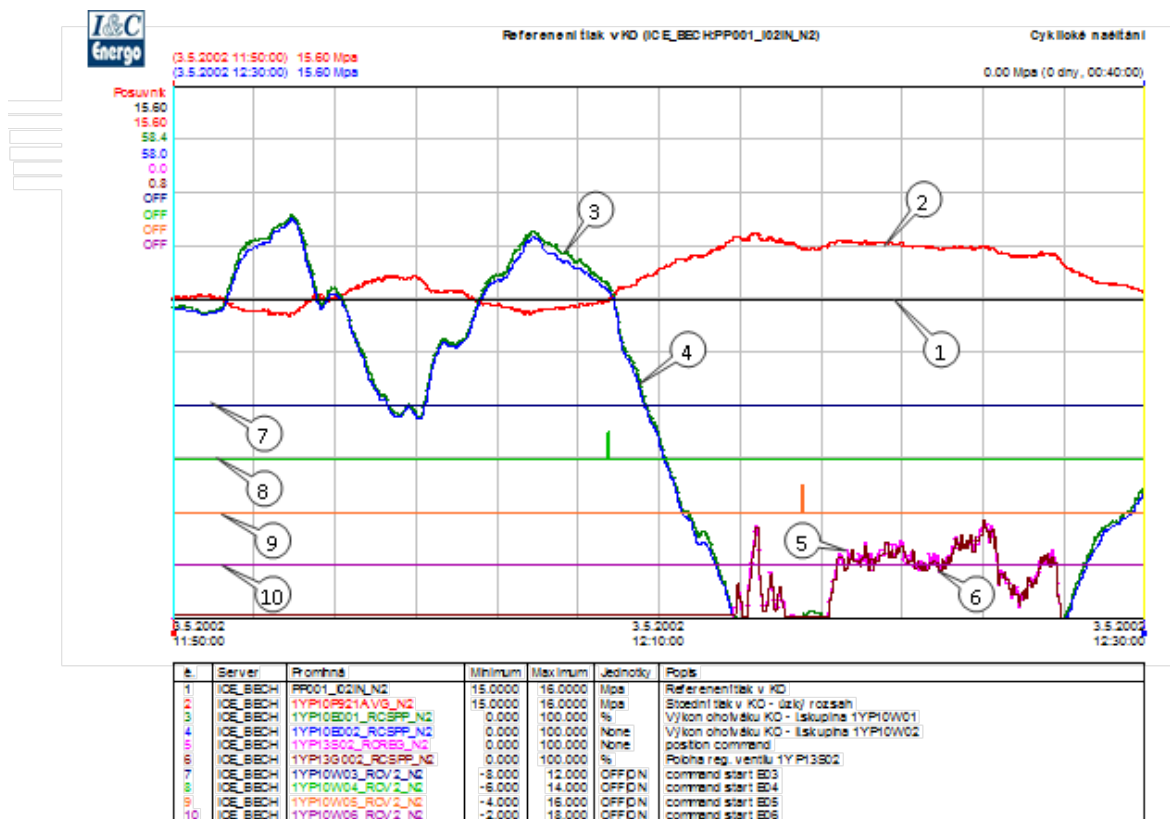


Test byl zahájen zapnutím korektoru frekvence v čase, kdy se frekvence v síti snížila (otáčky TG se snížily na 2997 ot/min). Korektor frekvence zvýšil výkon generátoru, turbína zvýšila odběr páry a tím došlo k poklesu tlaku v HPK. Teplotní efekt pak způsobil nárůst výkonu reaktoru o cca 1% N_{nom} . (viz červenou křivku č.3 na obr. 35).

Střední teplota moderátoru poklesla o 0,6 K (viz obr 34), hladina v KO poklesla z 817 na 811 cm. Tento pokles poměrně dobře odpovídá výpočtu. I když nejde o nikterak velkou hodnotu poklesu hladiny, tlak v KO se snížil z 15,6 na 15,57 což stačilo rozkývat regulátor tlaku v KO zvýšením výkonu dvou regulačních elektroohříváků KO (viz obr.36, křivky 3, 4) a jeho následujícím snížením po přeregulování. Toto rozkolísání způsobilo následně i krátkodobé otevření vstříků do KO. Z průběhu přechodového děje je patrné, že zásah regulací KO byl nejen zbytečný ale, došlo k přeregulování až na 15,72MPa.

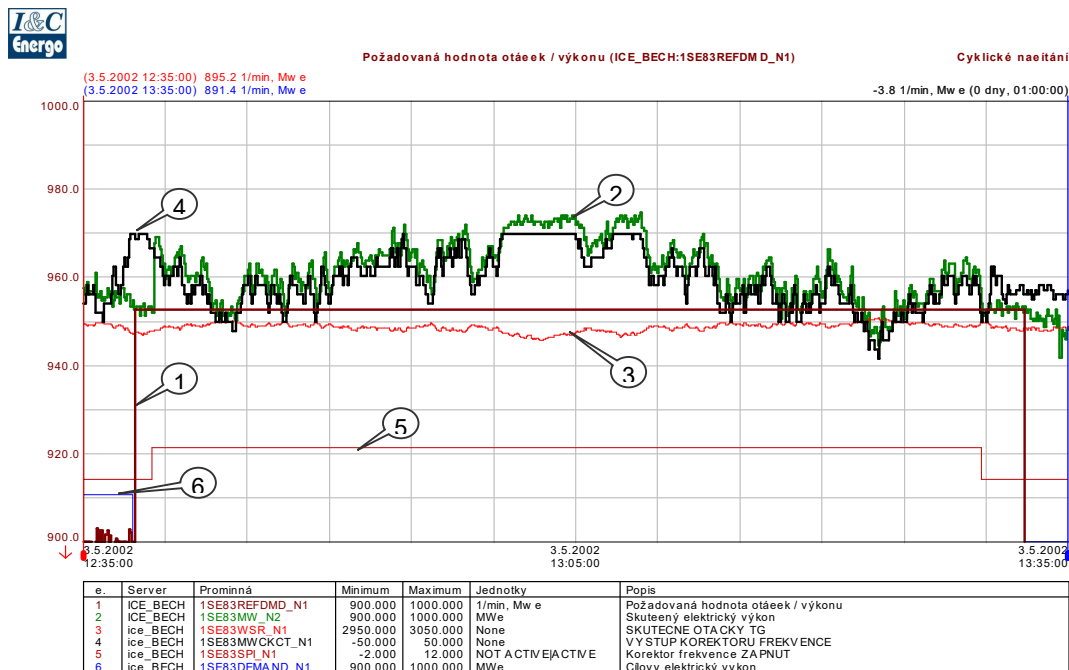
Regulátor tlaku (tj. zapínání EOKO) zasluhuje nastavit určitou necitlivost, aby nezasahoval při relativně malých změnách tlaku v I.O., případně menší proporcionalitu, aby vzrůst výkonů regulačních EOKO byl mírnější. Citlivost regulátoru tlaku v KO způsobila zvýšení výkonu regulačních skupin EOKO ze 60 na cca 75% jejich výkonu po snížení tlaku v I.O. o 0,03 MPa.)

Obr.36 ETE 1, Test č. 3 Parametry v KO – hladina, tlak, práce regulátoru hladiny a tlaku v KO

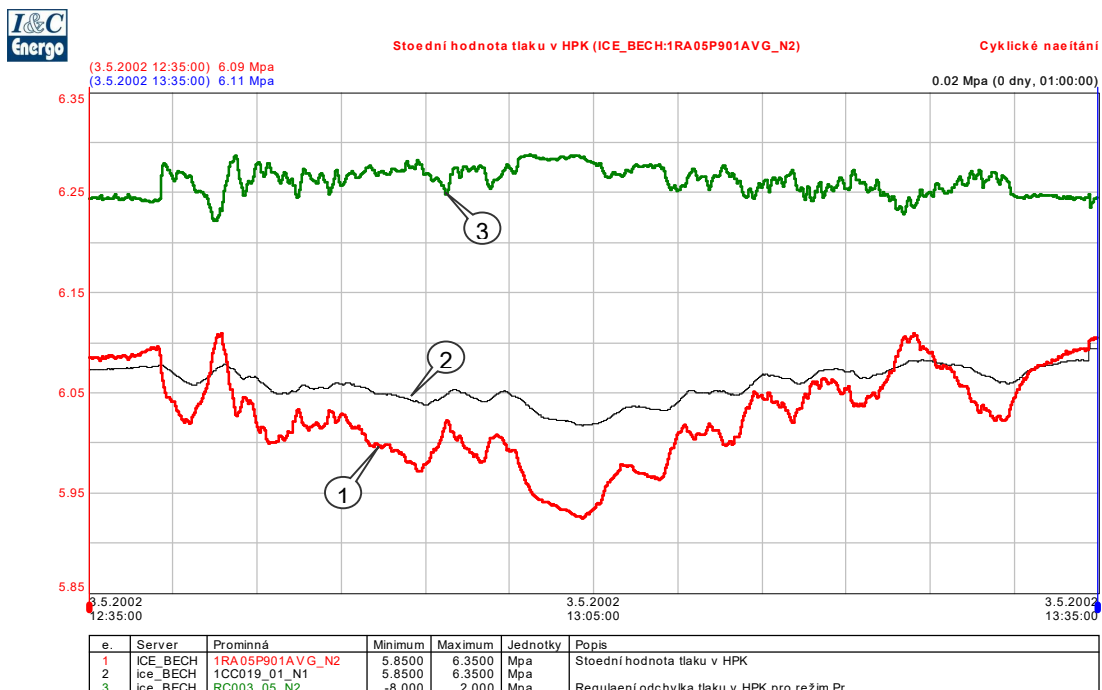


7.1.3 Test primární regulace v normálním provozu (NP) při výkonu blízkém 100% N_{nom} , statika KORf 4%

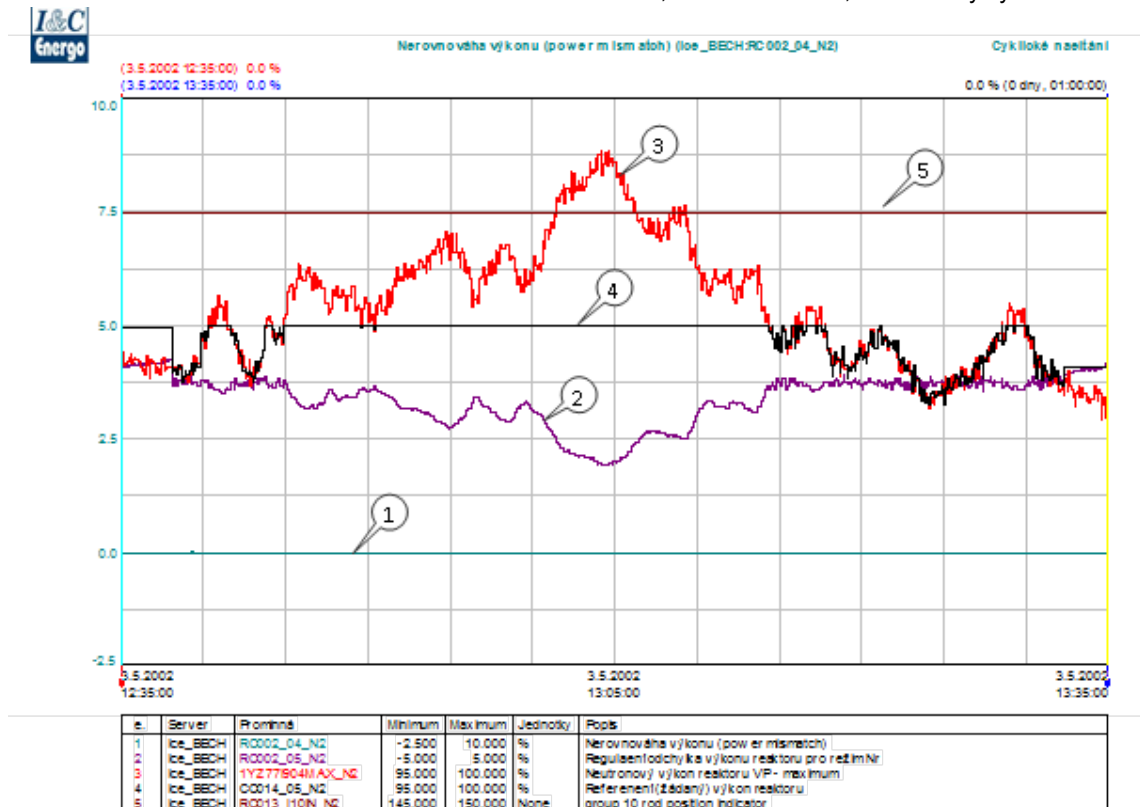
Obr.37 ETE 1, NP blízko 100%, Otáčky TG (křivka 3) a elektrický výkon generátoru



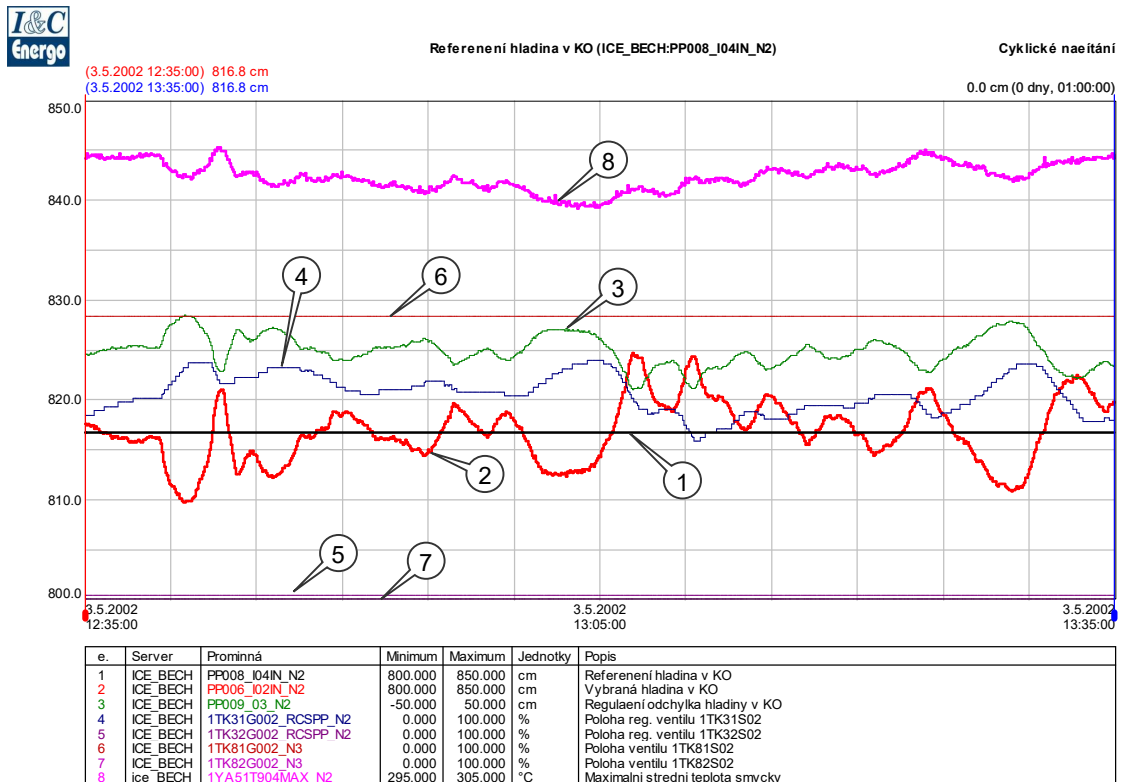
Obr. 38 ETE 1, NP blízko 100%, Tlak v HPK (červený)



Obr.39 ETE 1, NP blízko 100%, Neutronový výkon reaktoru



Obr.40 ETE 1, NP blízko 100%, Hladina v KO, střední teplota smyčky a informace o doplňování I.O.



Otáčky TG v tomto režimu se pohybovaly mezi 2996 min⁻¹ a 3000 min⁻¹, tj frekvence v síti byla (50 – 0,0667) Hz. Výkon TG dosáhl „stropu“ KORf při cca 972 MWel, když při 50 Hz byl elektrický výkon ~ 952 MWel.

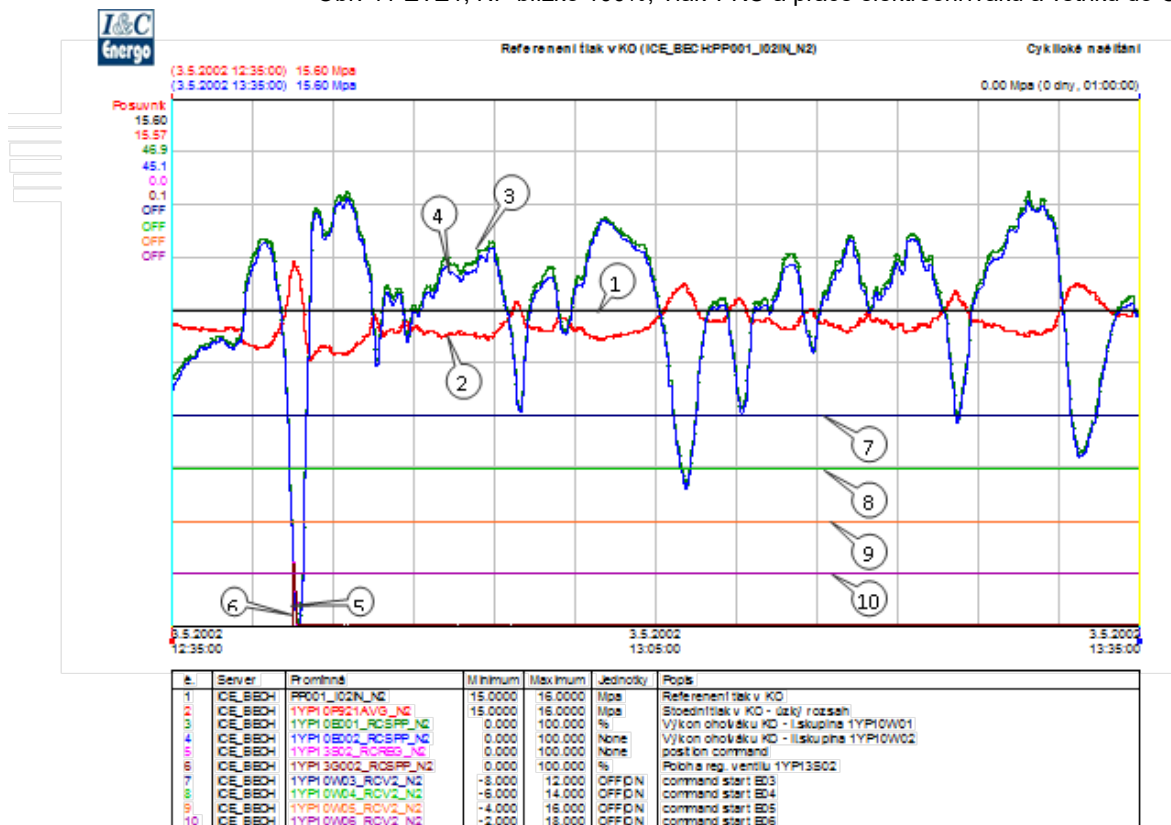
Tlak v HPK (obr. 38) měl nejnižší hodnotu 5,925 MPa a nejvyšší 6,12 MPa.

Neutronový výkon reaktoru (obr. 39) dosáhl maxima 99,5% Nnom, a minima 98,0% Nnom tj. změna o 1,5% Nnom (při vyloučení rušivých registrovaných změn v době 12:35 až 12:45)

Registrovaná změna střední teploty (obr.40) byla mezi 302,8 až 304,1°C, čili změna o 1,3K.

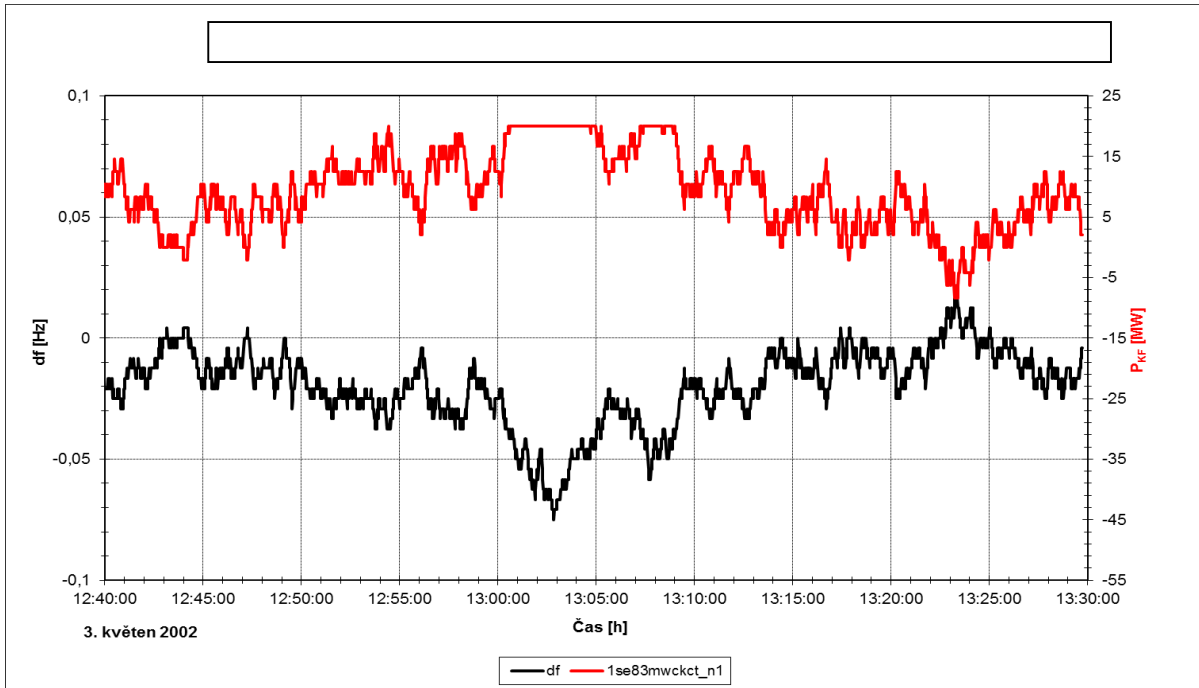
Těmto změnám odpovídá $\kappa_t = 34$ MWt/K, což je poměrně dobrá shoda s teorií.

Obr. 41 ETE1, NP blízko 100%, Tlak v KO a práce elektroohříváků a vstřiku do O

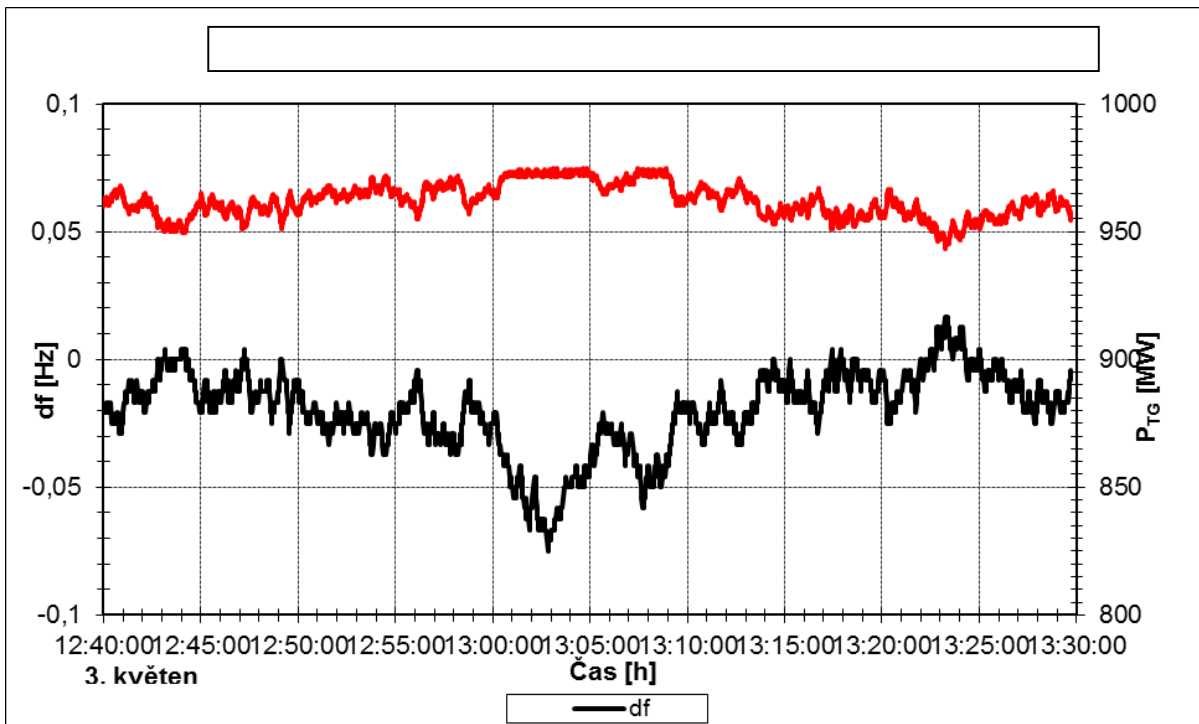


Lepší čitelnost vybraného vzorku testu normálního provozu je patrná z následujících obrázků 42 a 43

Obr. 42 Časový výřez testu. Černá křivka průběh frekvence, červená křivka výstup z KORf



Obr. 43 Časový výřez testu. Černá křivka průběh frekvence, červená křivka skutečný elektrický výkon



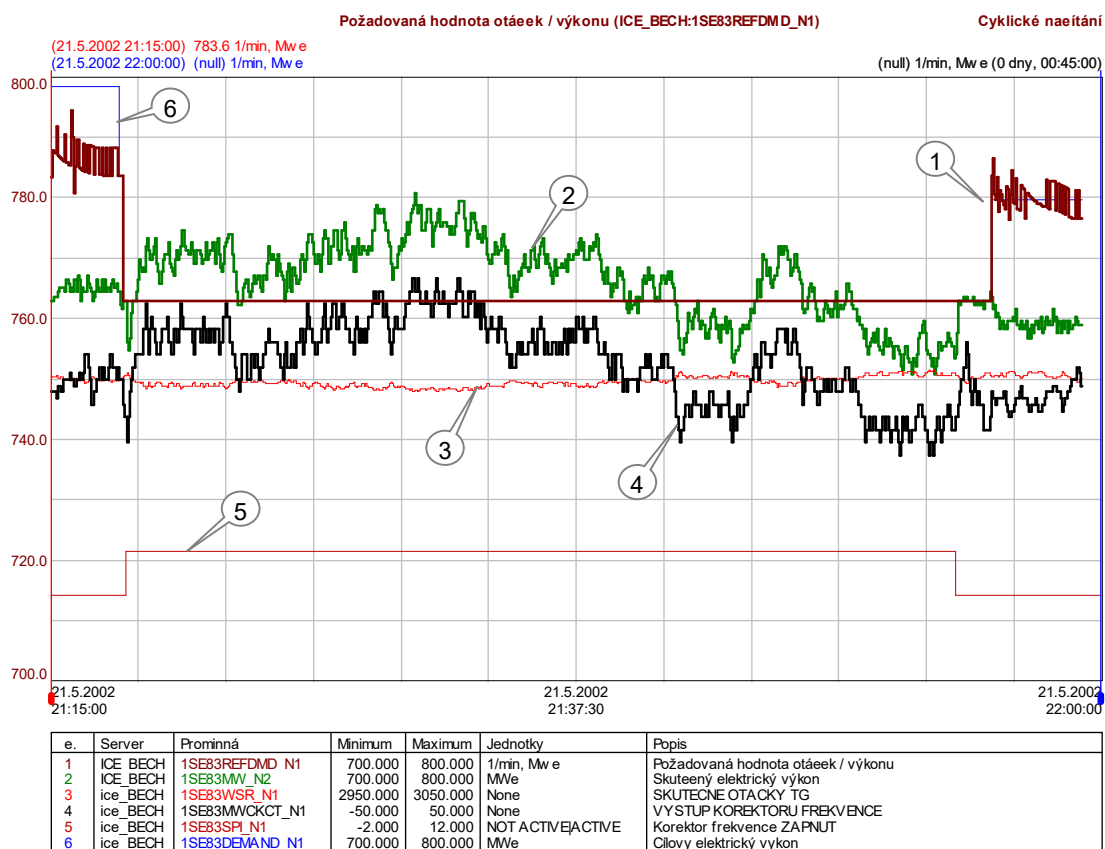
V obou obrázcích je průběh frekvence v síti (černá křivka) mnohem lépe čitelný. Ze záznamu je vidět, že změny frekvence se pohybují v mezích $\pm 0,035\text{Hz}$, avšak na těchto změnách jsou superponovány ještě drobnější změny $\pm 0,005\text{ Hz}$ indikující stochastické změny v síti.

Červená křivka v obr. 42 ukazuje průběh výstupu z KORf, jako odezvy na změny frekvence. V obr. 43 je průběh elektrického výkonu. Z obou obrázků je patrné, že při snížení frekvence pod mez zadanou v KORf ($- 0,04\text{ Hz}$), kdy KORf dosáhl maximální zadané hodnoty $+20\text{MW}$ a skutečný elektrický výkon dále nemůže stoupat.

7.1.4 Test primární regulace v normálním provozu (NP) při výkonu blízkém 80% N_{nom} - Statika KORf 4%

Tento test je podobný předcházejícímu, pouze na nižší hladině výkonu reaktoru. Skutečný elektrický výkon generátoru (zelená křivka č. 2 v obr. 44) poměrně věrně kopíruje výstup z KORf (černá křivka č. 4). Červená křivka (bohužel s nevyhovujícím měřítkem) ukazuje změnu otáček TG mezi 2980 až 3001 ot/min, tj 49,67 až 50,017 Hz.

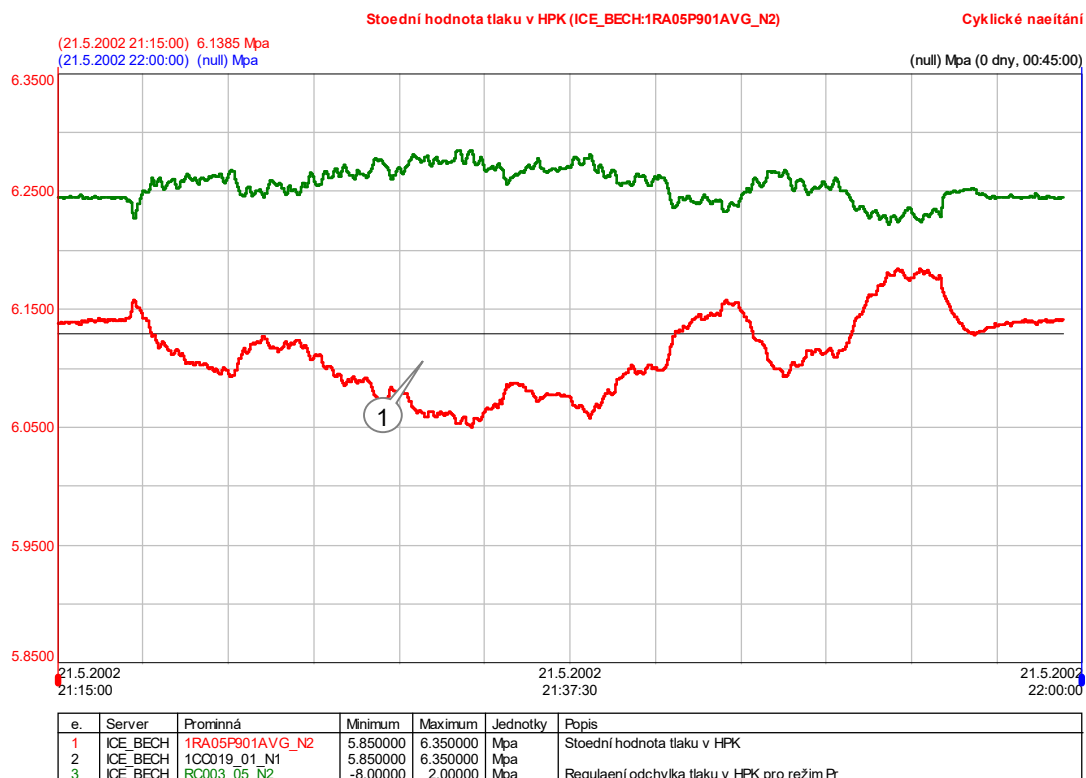
Obr.44 ETE 1, $N_R \sim 80\%$, Odezva výkonu TG na změnu otáček



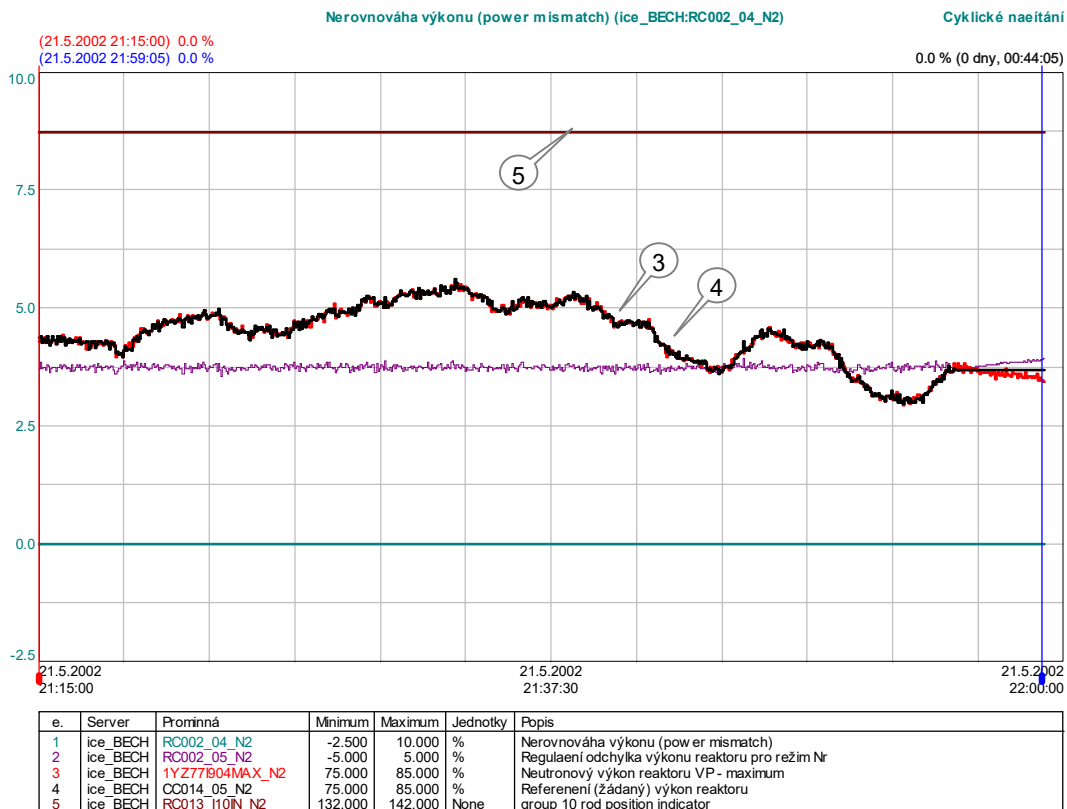
Tlak v HPK (obr. 45) se podle elektrického výkonu (tj. odběru páry), pohyboval od 6,13 MPa na počátku až k 6,05 aby následně znova nastoupal až na 6,18 MPa . Na změnu tlaku v HPK reaguje teplota moderátoru a tím se teplotním efektem mění i výkon reaktoru z 80,5% N_{nom} na 81,4 % a následně poklesl až na 79,5 % N_{nom} .

Skutečné otáčky TG mají v grafu opět nevhodné měřítko, které potlačuje rozlišení zobrazených hodnot.

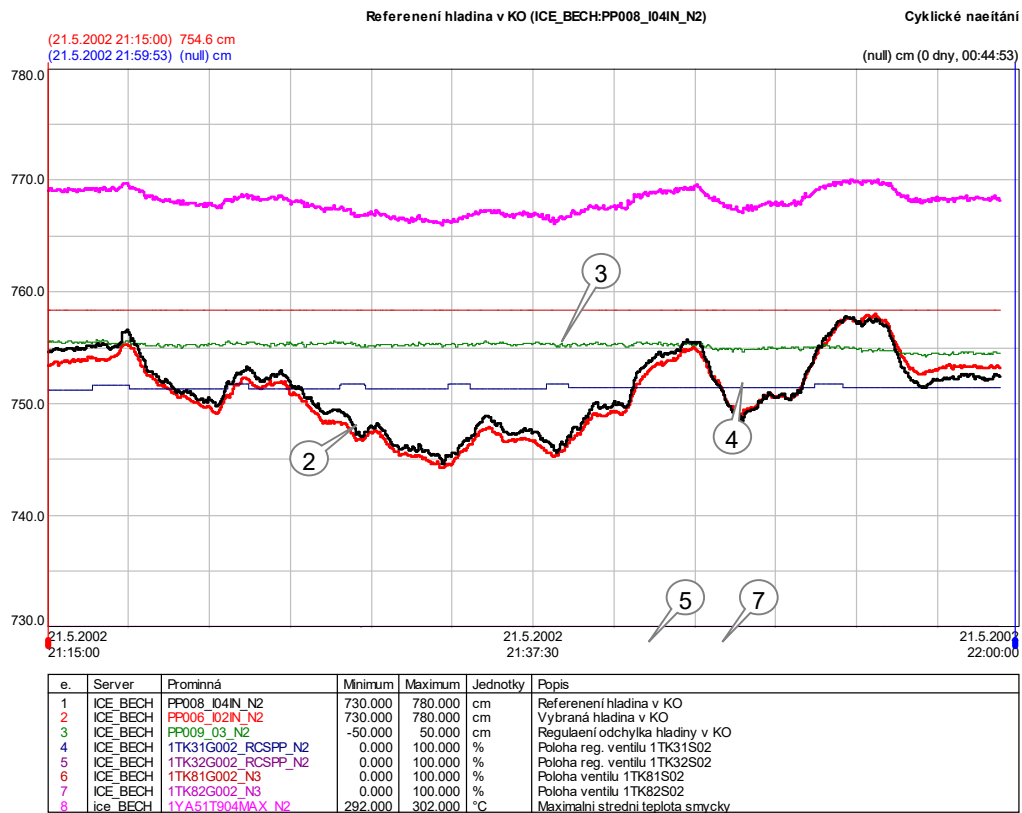
Obr. 45. ETE 1, N_R ~ 80%, Tlak v HPK (červená křivka)



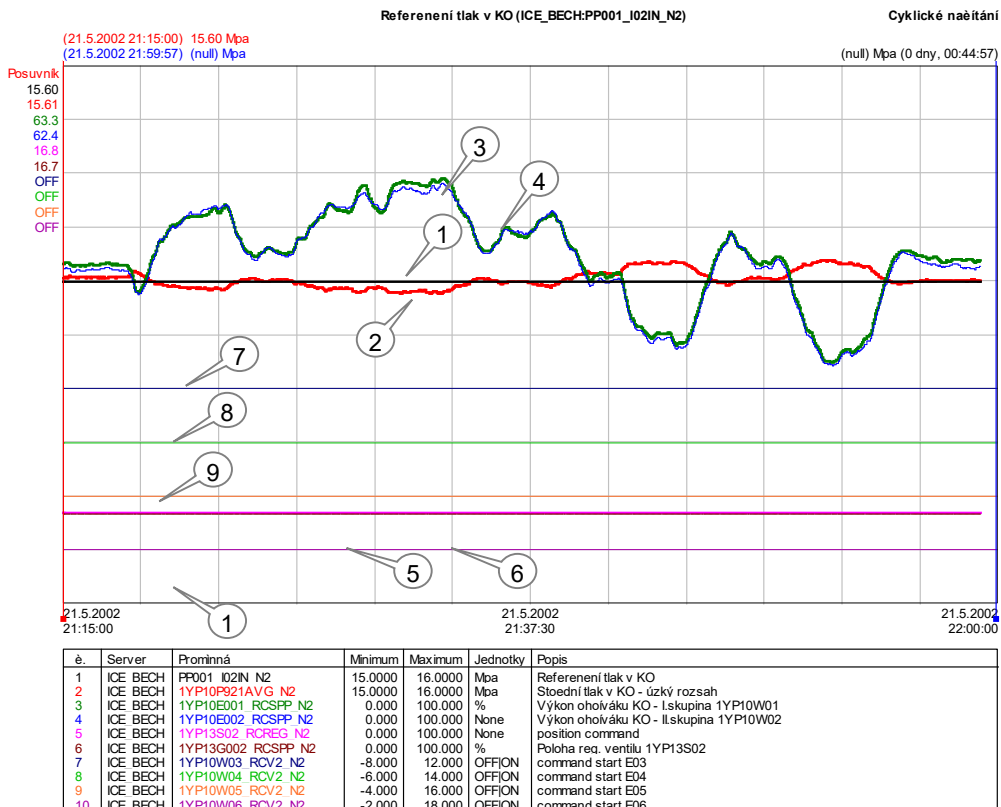
Obr. 46 Neutronový výkon reaktoru



Obr. 47 Hladina v KO



Obr. 48 Tlak v KO

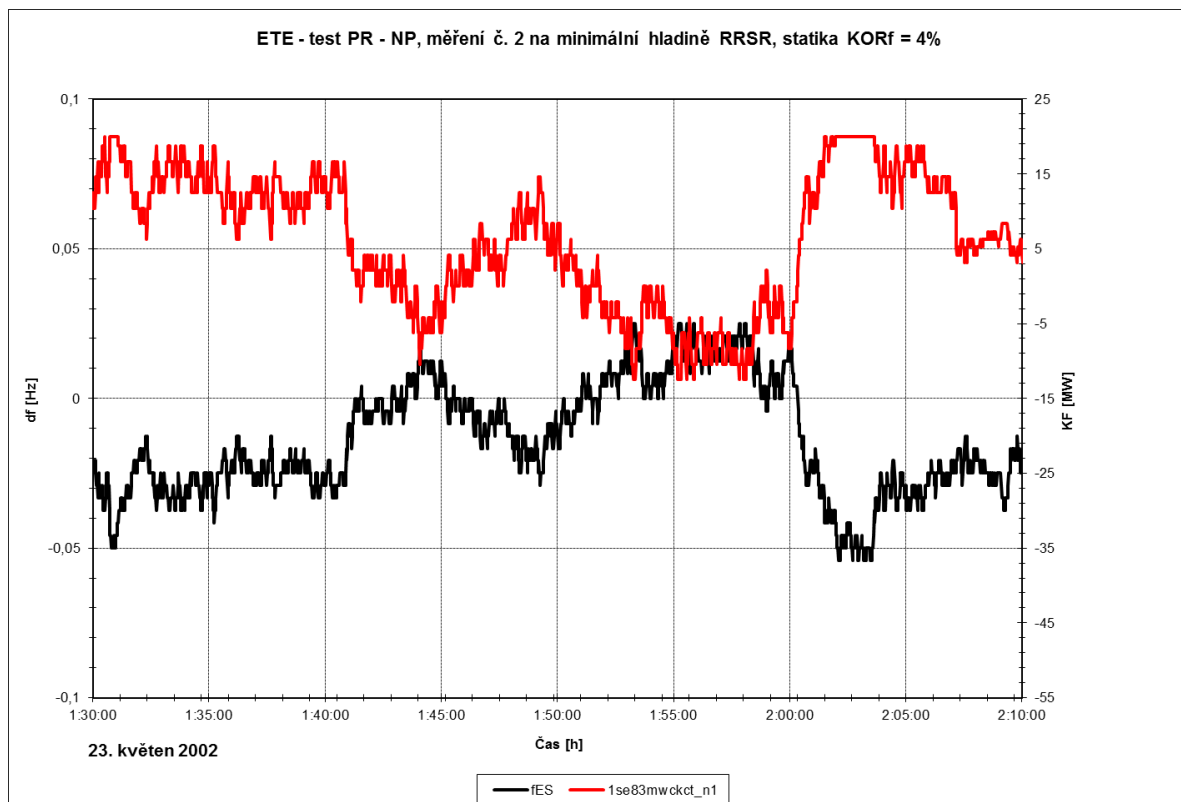


Z obrázků 47 a 48 je zde opět vidět rušivé zásahy regulátoru tlaku v KO, avšak regulátor hladiny byl v tomto případě nastaven lépe: zadaná hodnota pro regulátor hladiny byla korigována teplotou moderátoru, takže hodnota doplňování / odpouštění se drží takřka na konstantní hodnotě.

7.1.5 Test PR v provozu (NP) při výkonu blízkém $60\%N_{nom}$, statika KORf 4%

Obr. 49 ukazuje výstup z korektoru frekvence v reakci na odchylky změny frekvence od 50 Hz, zatímco obr. 50 ukazuje průběh skutečného elektrického výkonu v reakci na výstup z KORf. Na průběhu frekvence jsou vidět, podobně jako u jiných měření, relativně malé, ale četné odchylky odregulované setrvačností turbosoustrojí, i větší změny, které vedou až ke snížení frekvence pod 49,96 Hz, kdy KORf už dospěl k nastavenému stropu a nepřipouští další zvýšení elektrického výkonu. Po návratu frekvence nad 49,96 Hz se znovu ujímá své role.

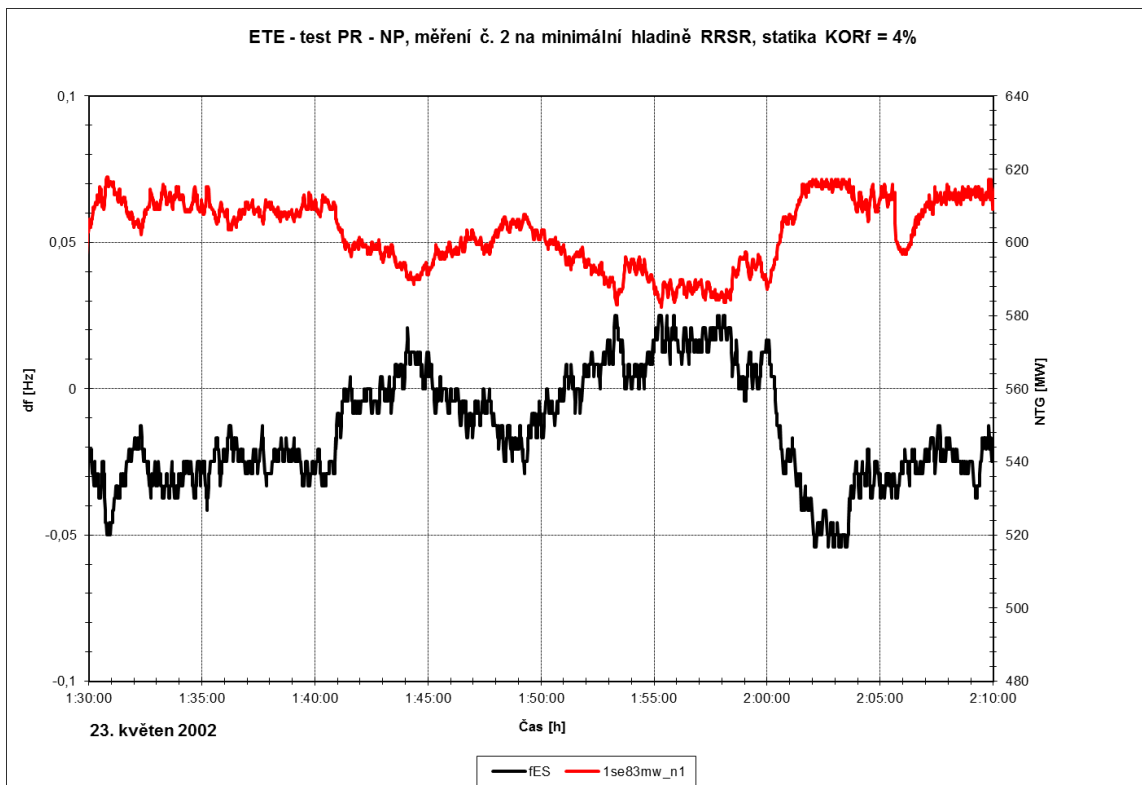
Obr. 49. ETE 1, test PR – NP na minimální hladině výkonu . Výstup KORf



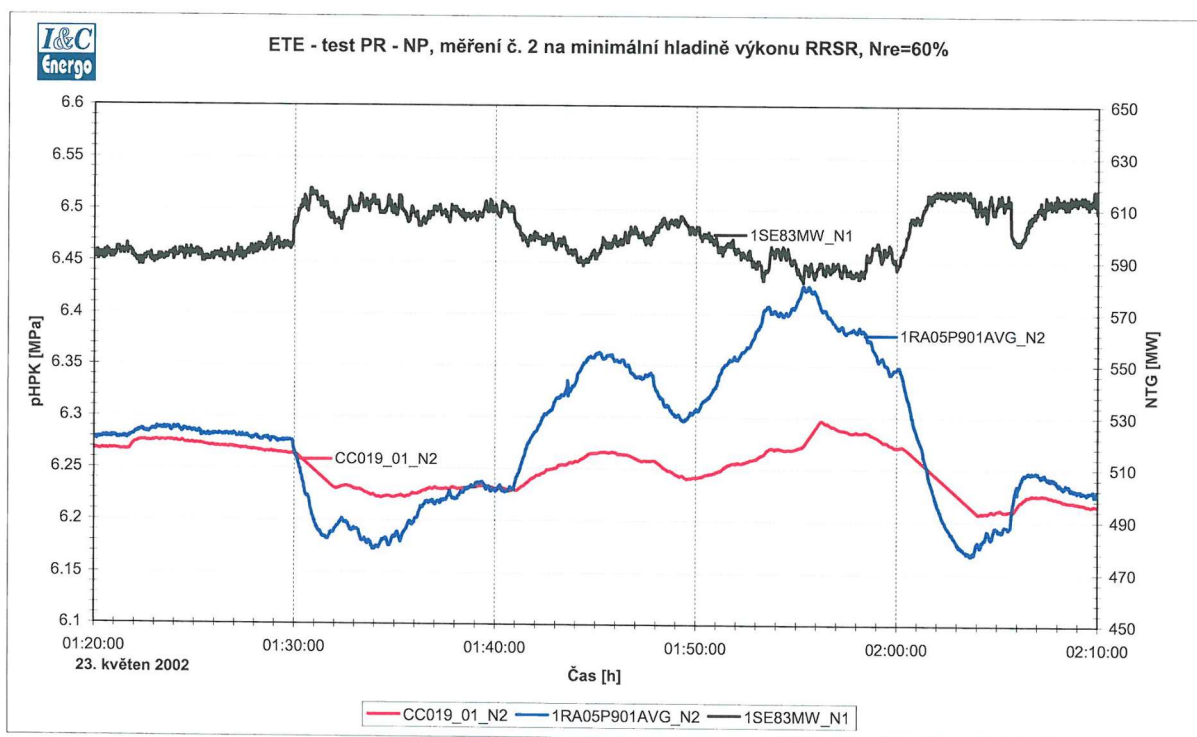
Výkon alternátoru poměrně dobře kopíruje výstup z KORf, červená křivka na obr. 50 a černá křivka na obr. 50 a pohyboval se od 585 až do cca 618 MW.

Na změny zatížení alternátoru reaguje tlak v HPK nejprve poklesem z 6,27 MPa na 6,17 a následně vzrůstem až na 6,43 MPa, aby pak rychle znovu poklesl na 6,17 MPa.

Obr. 50. ETE 1, test PR – NP na minimální hladině, KORf sw=4%, skut výkon TG

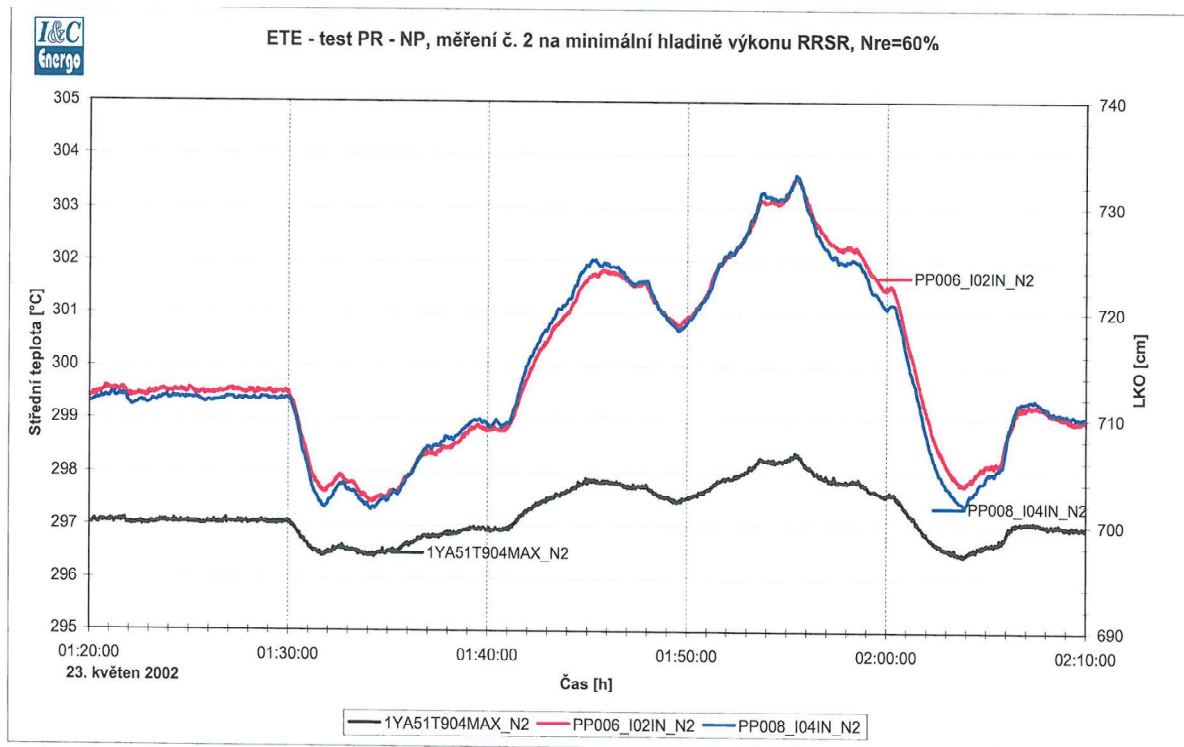


Obr. 51 Průběh elektrického výkonu (černá křivka), tlaku v HPK (modrá křivka) a výstup z CC



Pozornost si zaslouží, jak dobře (logicky) kopíruje hladina moderátoru v KO (červená a modrá křivka v obr. 52) průběh tlaku v HPK (modrá křivka v obr. 39).

Obr. 52 Hladina v KO jako reakce na změnu střední teploty primárního chladiča

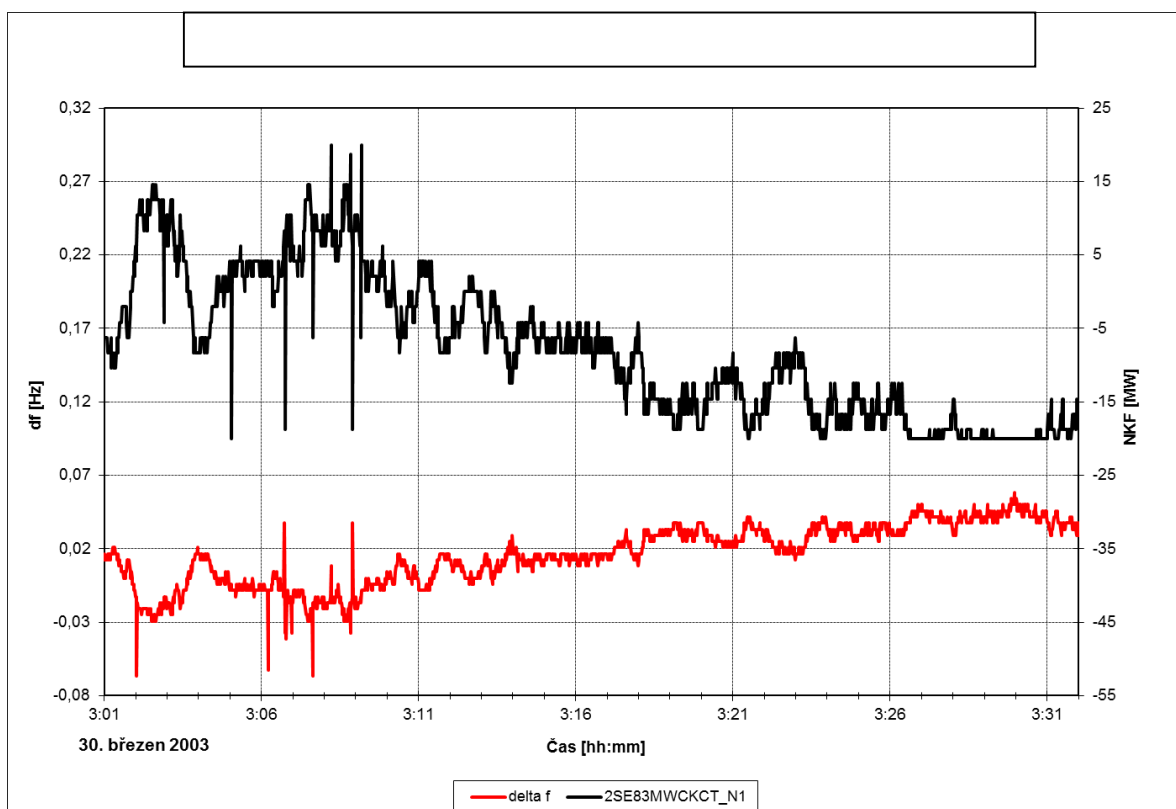


7.2 ETE 2

Pro 2. Blok ETE se uchovalo mnohem menší množství podkladů. Některá měření nebyla k dispozici ani v ETE, ani v I&C Energo. Proto je popis těchto testů méně obsažný v porovnání s blokem č. 1.

7.2.1 Měření NP na maximální hladině výkonu, $s=4\%$

Obr. 53 Test PR při normálním provozu na výkonu blízkém 100%, s KORf = 4%

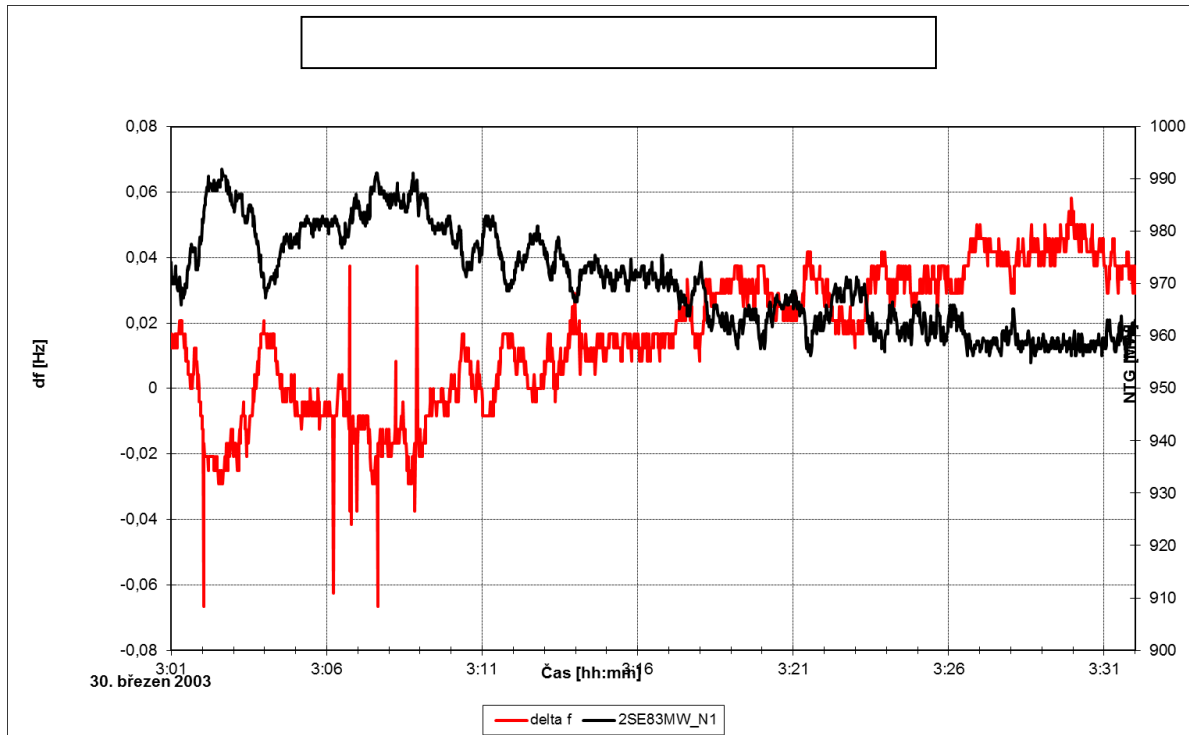


Na obr. 53 je záznam výstupu z KORf (černá křivka) jako odezvy na změnu frekvence od 50 Hz (červená křivka). Jde o záznam při zapnutém KORf.

Na obr. 54 je rovněž červenou křivkou změna frekvence, černá křivka je záznamem skutečného elektrického výkonu v mezích 992 až 958,34 MW_{el}, tj $\Delta N_{El} = 33,56 \text{ MW} \sim 0,33\% N_{El \text{ nom.}}$. Tomu odpovídá $\Delta N_R \sim 0,283\% N_R$ a tedy $\Delta N_R \sim 84,9 \text{ MWt}$.

Největší naměřené odchylky frekvence byly -0,0292 až +0,042 Hz.

Obr. 54 Test PR při normálním provozu na výkonu blízkém 100%, sKORf = 4%



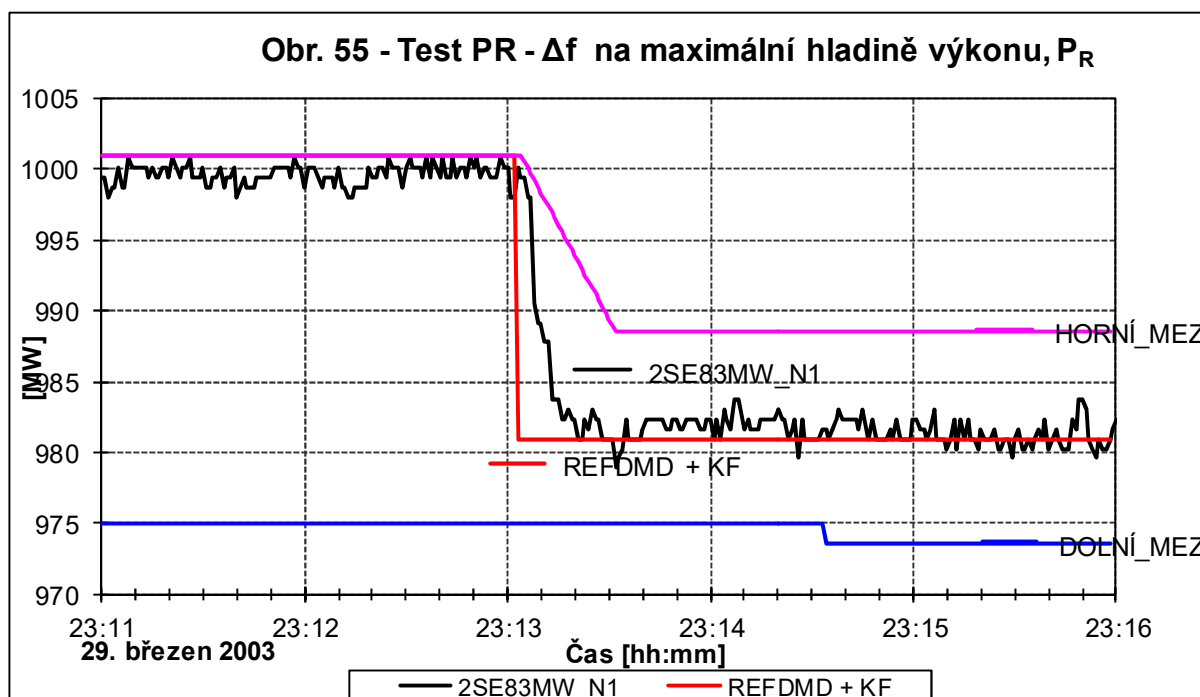
Z číselných záznamů bylo zjištěno, že tlak v HPK odpovídající těmto odchylkám byl 5,96 až 6,188 MPa tomu odpovídá cca $\Delta t = 2,77$ K.

Takovým změnám odpovídá $\kappa_t = 30,6$ MWt/K, což je hodnota odpovídající cca 140 efektivním dnům.

Zatímco hodnoty frekvence, elektrického výkonu a tlaku v HPK byly zaznamenány digitálně, ostatní parametry, ani vyhoření zóny, na níž byly testy prováděny, nebyly k dispozici.

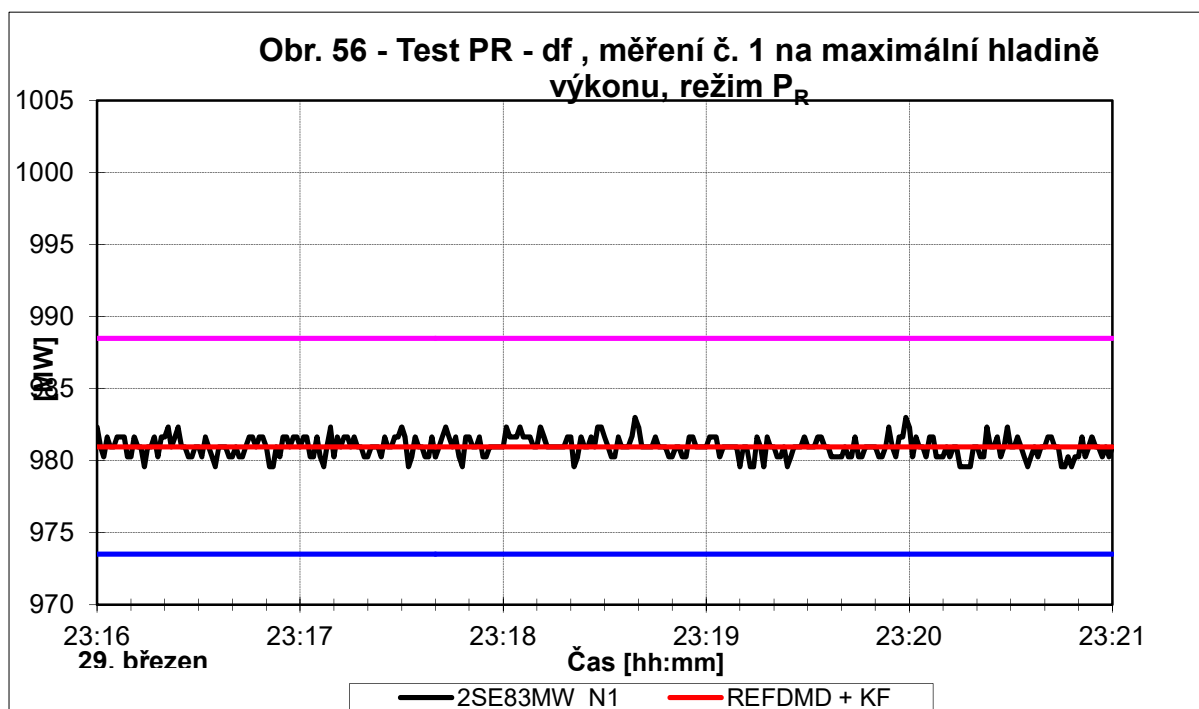
7.2.2 Test PR imitaci zvýšení otáček TG o ± 5 ot/min na maximální hladině výkonu, $s=4\%$

Následující obrázek (č. 55) ukazuje průběh výstupu z KORf (červená křivka) a skutečného elektrického výkonu generátoru (černá křivka) po simulaci změny otáček TG o +5 ot/min při zapnutém korektoru frekvence. Na tuto simulaci odpovídá TG snížením výkonu o cca 20 MWel. Z digitálních záznamů byly zjištěny PHPK= 5,89 až 6,05 MPa tomu odpovídá rozdíl teploty sytosti 2 K. Výkon generátoru byl 998 až 980 MWel tj. $\Delta N_{E1} = 18 \text{ MW} \sim 0,18\% N_{nom}$. Tomu odpovídá změna výkonu reaktoru o 0,15% NR , $\sim 46,40 \text{ MWt}$. Odtud plyne, že $kt = \sim 23 \text{ MWt/K}$. To je hodnota nižší o 10MWt/K, než zjištěná v prvních dvou měřeních. Odchytku je možné hledat jednak v jisté nepřesnosti měřených hodnot, v časovém posunu (kroku) sběru veličin.



I v případě tohoto testu se projevovala nestabilita elektrického výkonu před i po přechodových procesech. Výkyvy jsou zřetelné v grafických vyjádřeních, i v digitálních záznamech. Elektrický výkon se pohyboval před přechodovým procesem mezi 998 až 1001 MWel a po přechodovém procesu mezi 979.3 až 983 MWel, tj $\pm 1,5$ MWel. Podobný jev je i u dalších měření na obou blocích i v době, kdy není zapnutý korektor frekvence a lze jej vysvětlit změnami frekvence v síti jako následku fluktuace zátěže sítě. Jde o nám už známý jev, kdy se uplatňuje vliv setrvačnosti rotoru TG = GD^2 .

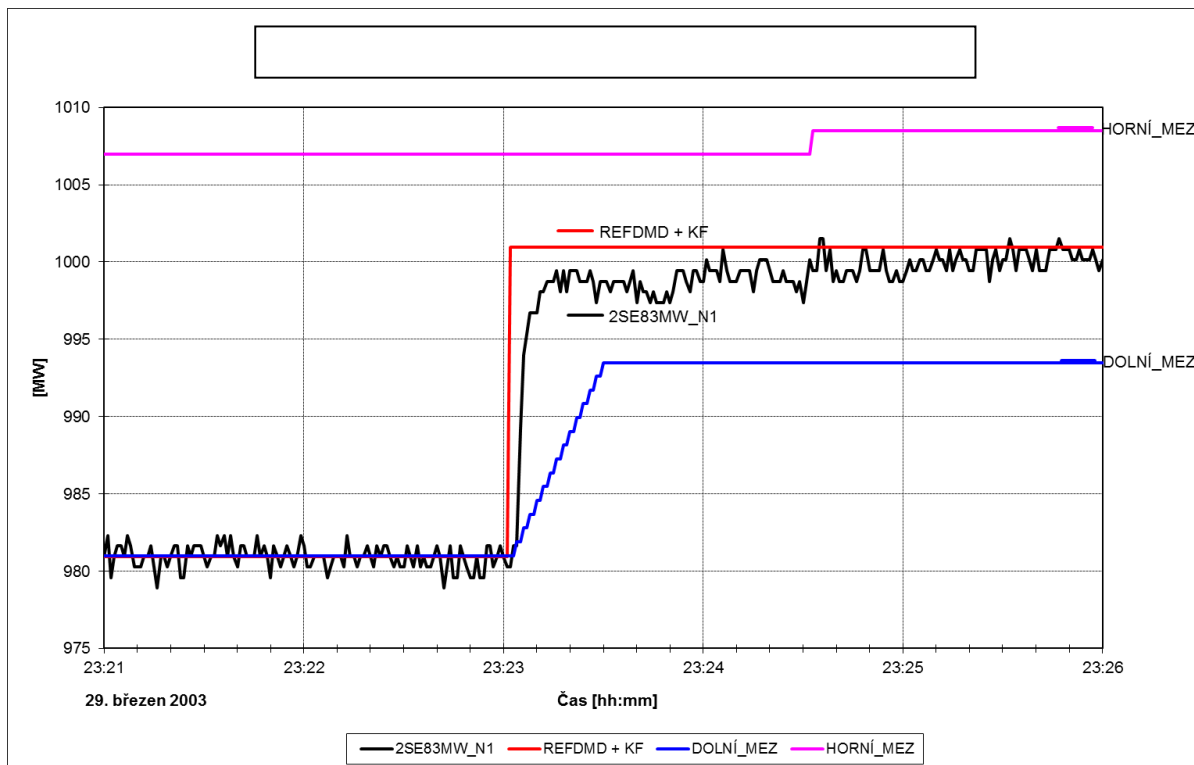
Měření na následujícím obrázku č. 56 je pokračováním předcházejícího měření a je na něm v ustáleném stavu patrný vliv fluktuace nerovnováhy výroby versus kolísavý odběr v síti.



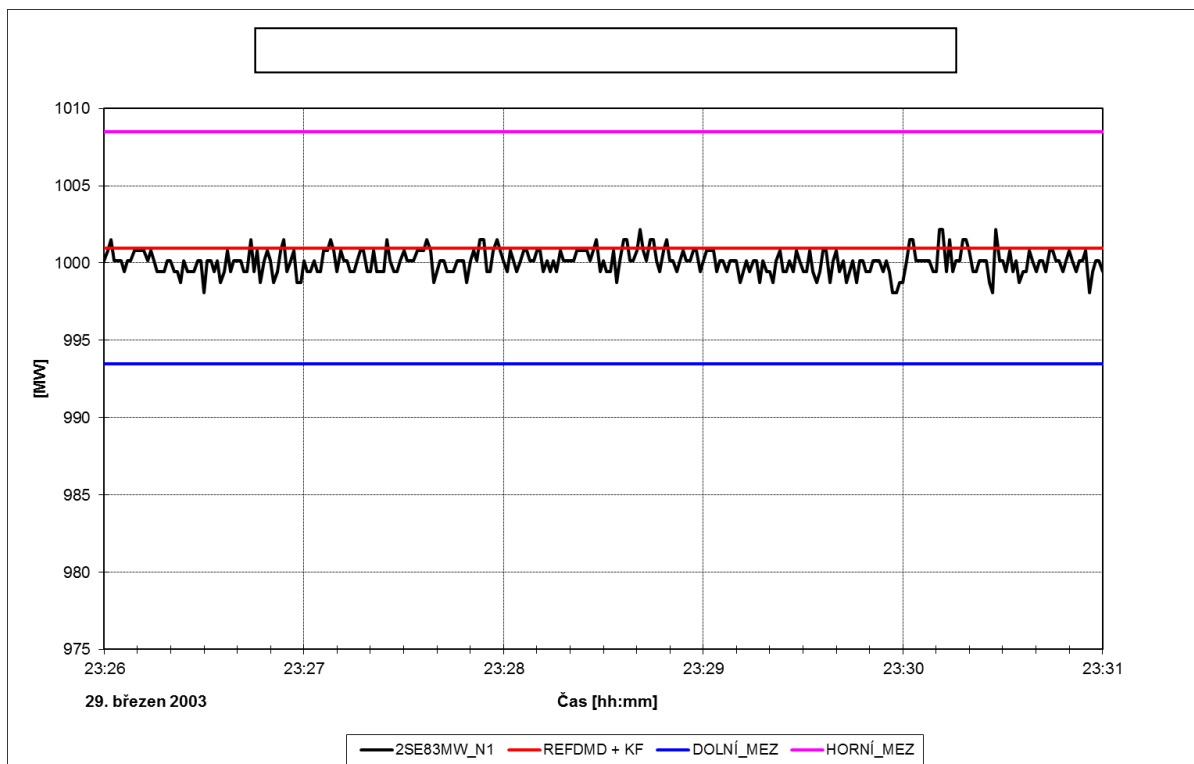
Obr. 57 zaznamenává test při simulaci snížení otáček o 5 ot/min. - po simulaci zvýšení otáček. TG reaguje zvýšením elektrického výkonu z 981 MWeI na 998 ± 2 MWeI s postupným dalším zvyšováním (během dvou minut) elektrického výkonu až na $1000 \pm 1,5$ MWeI .

Obrázek 58 zaznamenává opět ustálený stav po předcházejícím přechodovém procesu.

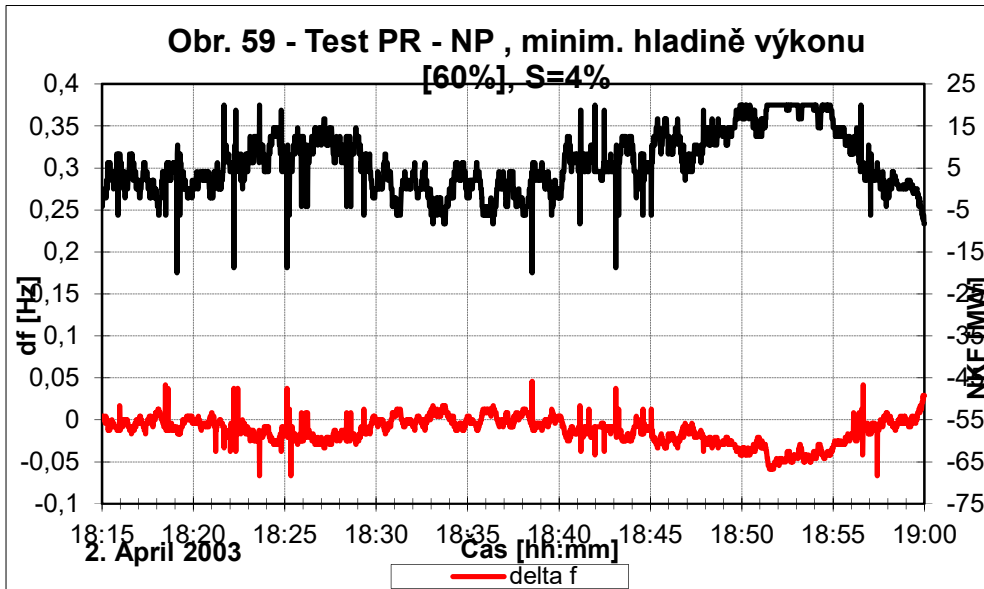
Obr. 57. Náběh zadaného výkonu z KORf a skutečného elektrického výkonu po simulaci snížení otáček TG



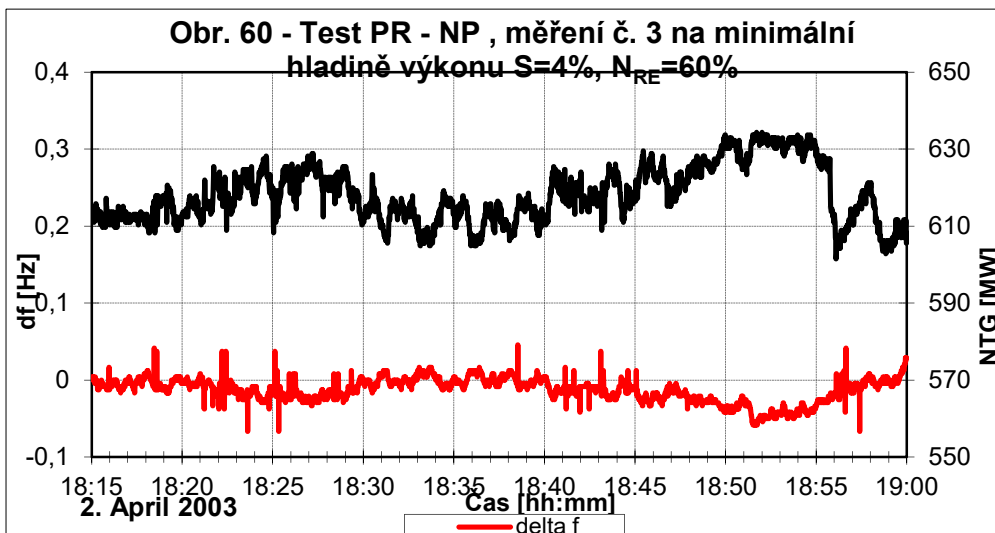
Obr. 58. Ustálený stav po přechodovém procesu z obr. 57.



7.2.3 NORMÁLNÍ PROVOZ NA MINIMÁLNÍ HLADINĚ VÝKONU, S=4%



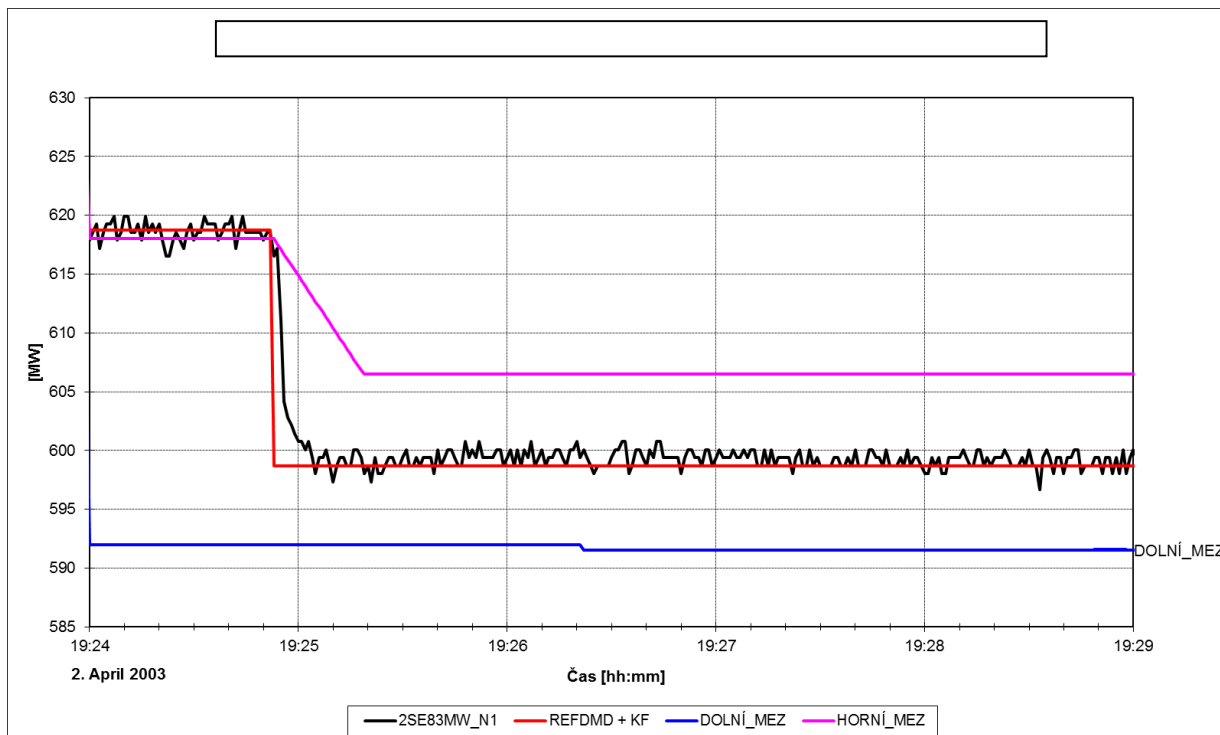
Na obr. 59 a 60 je červeně záznam odchylek frekvence od 50 Hz. Změna byla 49,92 až 50,05 Hz. V obr. 54 je černě záznam výstupu z KORf, na obr. 55 změny elektrického výkonu generátoru mezi 601 až 633 MWel, což je rozdíl 1,07 % N_{nom} .



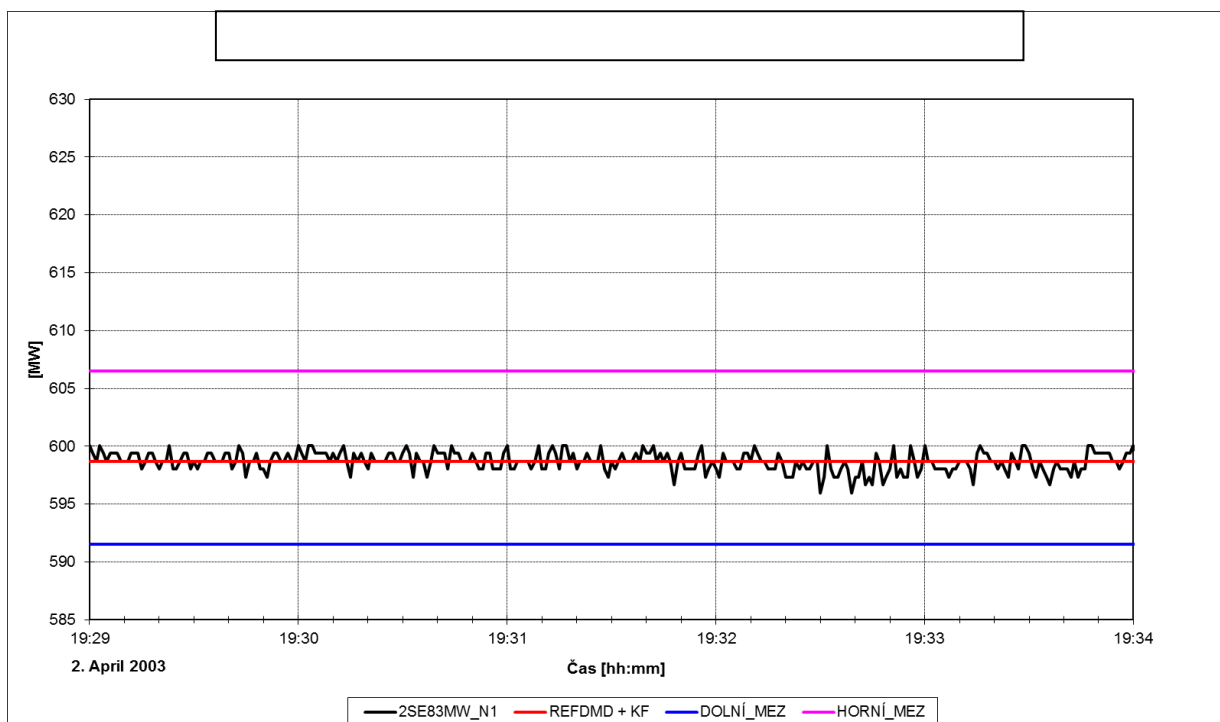
Na obr. 59 je vidět (v 18.52) dosažení horní meze zadaného výkonu (výstup z KORf) po snížení frekvence o 0,04 Hz, obr. 60 ukazuje elektrický výkon generátoru jako odezvu na výstupní signál KORf. Došlo tedy správně k omezení, i když frekvence ještě klesala.

7.2.4 Test PR imitací změny otáček TG o ± 5 ot/min na výkonu okolo 60% N_{nom} , $s=4\%$

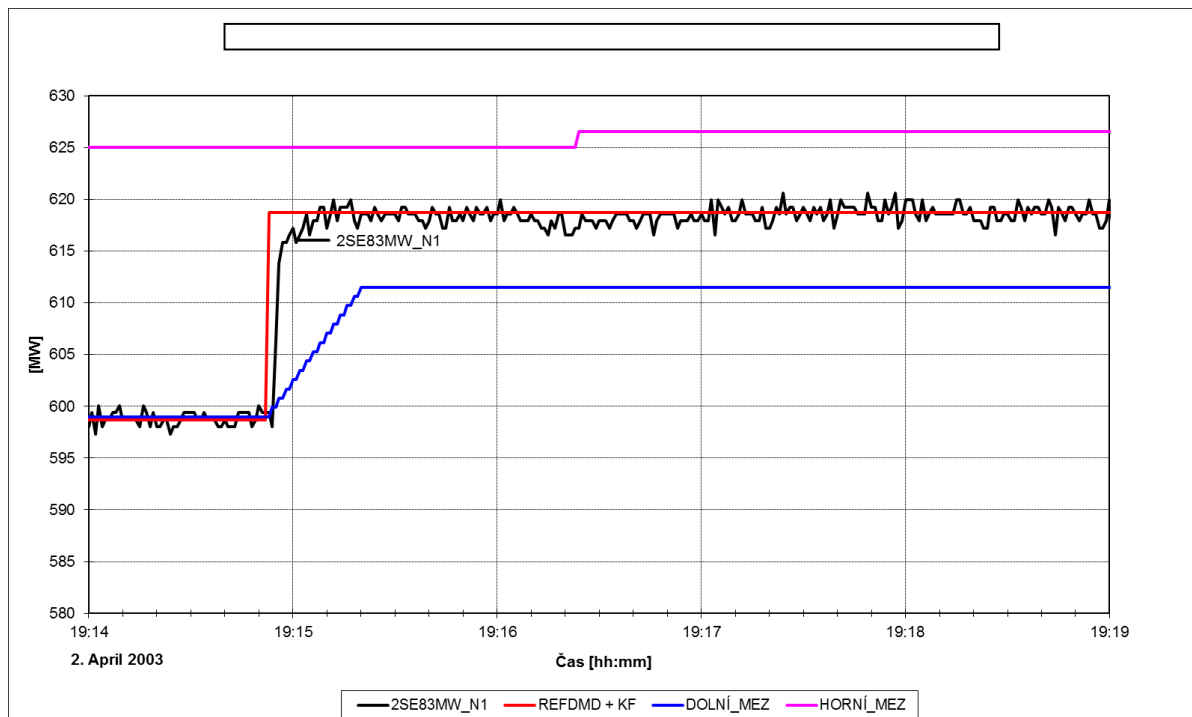
Obr. 61. Průběh zadaného výkonu z KORf a skutečného elektrického výkonu generátoru při imitaci +5ot/min



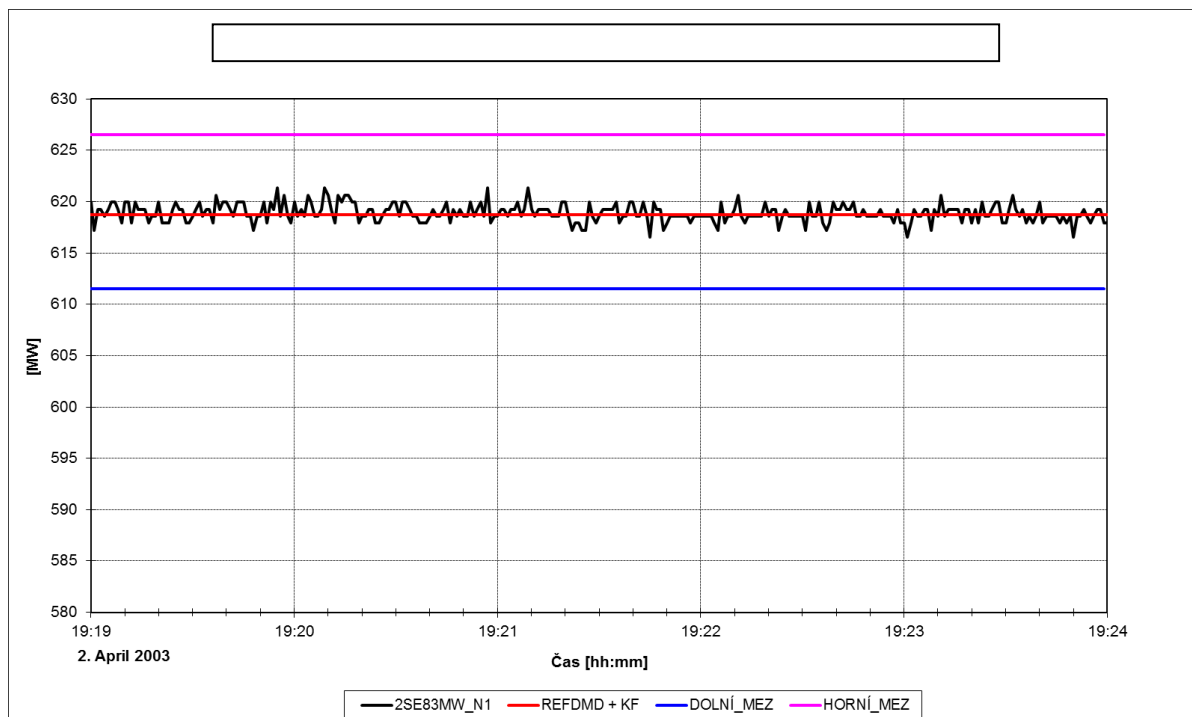
Obr. 62. Ustálený stav po přechodovém režimu dle obr. 61



Obr. 63. Průběh zadaného výkonu z KORf a skutečného elektrického výkonu generátoru při imitaci – 5ot/min

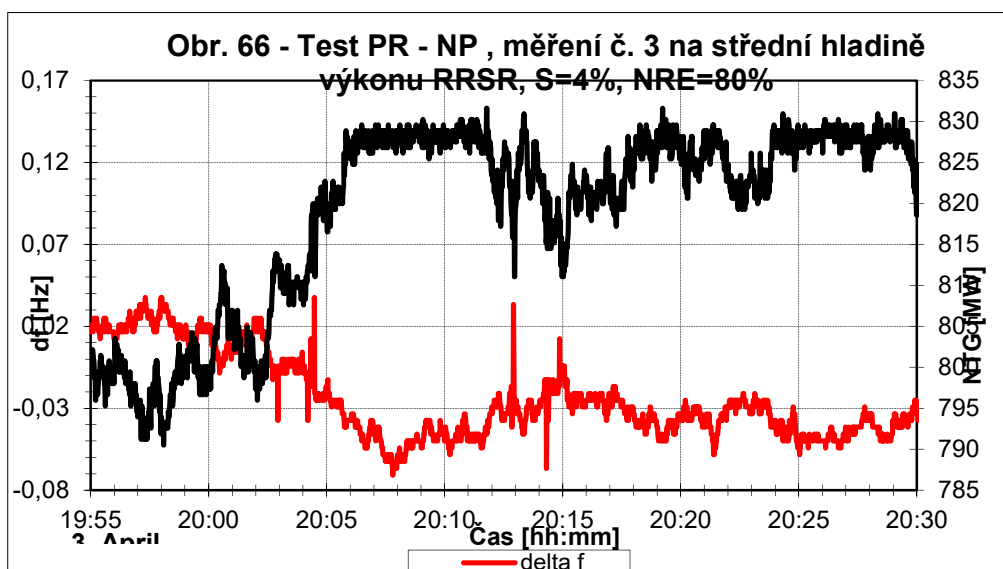
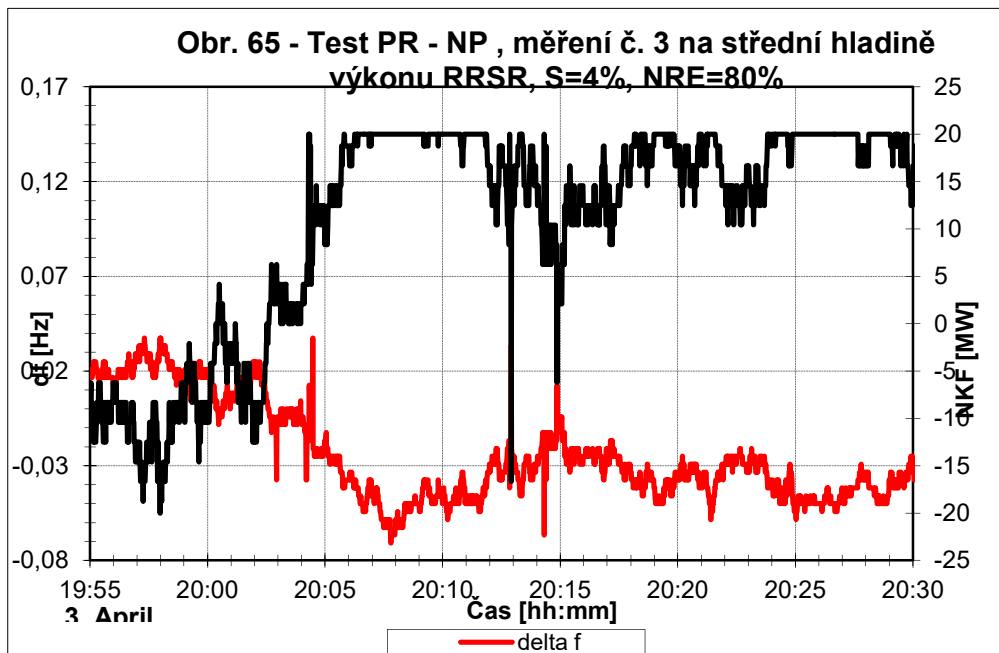


Obr. 64. Ustálený stav po přechodovém režimu dle obr. 63



V tomto případě jde o již známý režim, pouze na nejnižším testovaném výkonu. Parametry jsou popsány v předcházejících režimech.

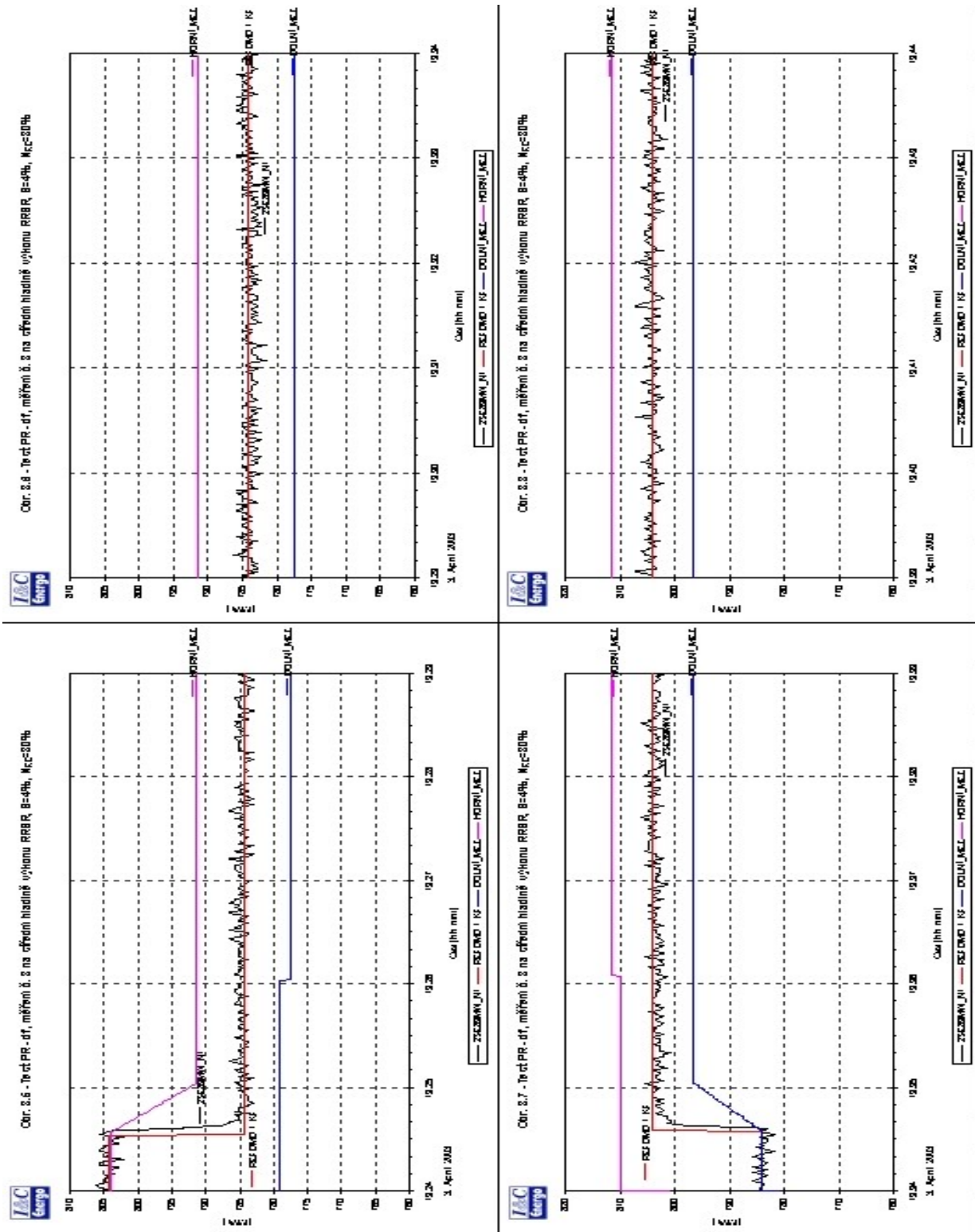
7.2.5 Test PR při normálním provozu na středním výkonu, $s=4\%$



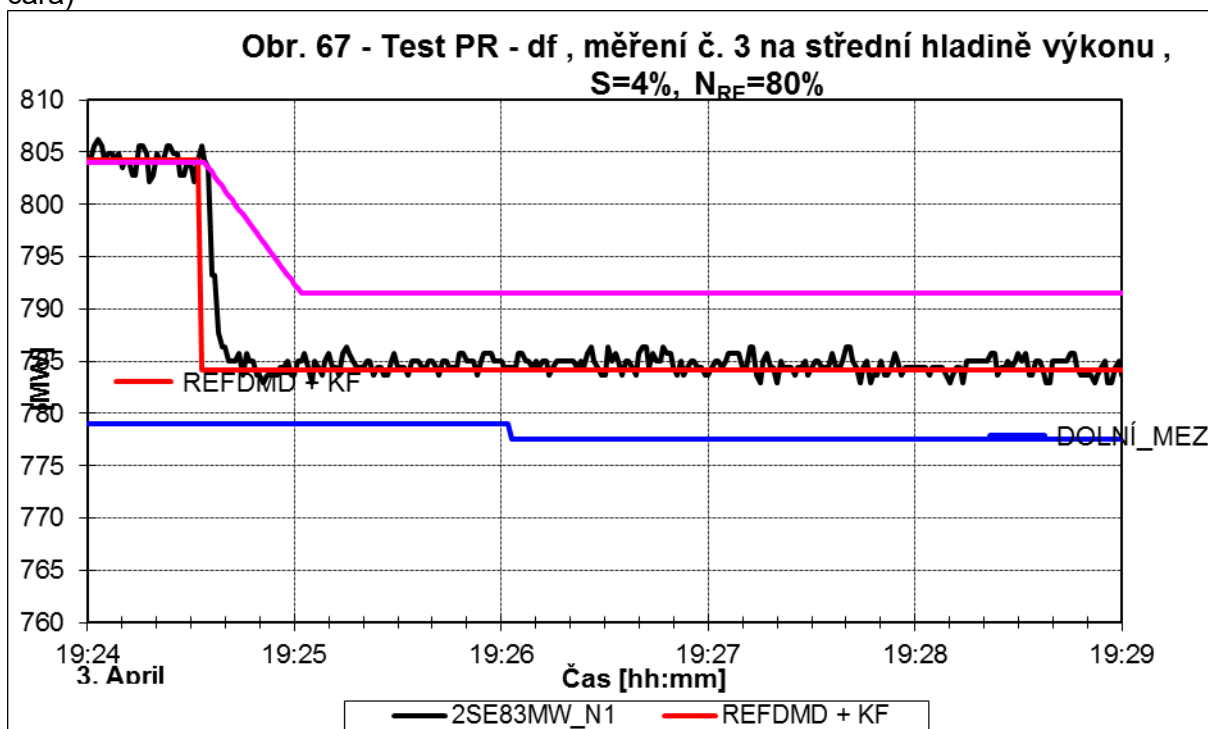
Obrázky 65 a 66 ukazují záznam měření při NP na cca $80\%N_{nom}$ ve stavu více rozkolísané sítě. Frekvence (červená křivka v obou obrázcích) padá z $+0,02$ na $-0,07$ Hz, $KORf$ opakovaně dosahuje nastavené meze (obr. 65). Na obr. 66 je černou křivkou zaznamenán skutečný výkon generátoru.

7.2.6 TEST PR IMITACÍ ZMĚNY OTÁČEK TG O ± 5 OT/MIN NA STŘEDNÍM VÝKONU (OKOLO 80% N_{NOM}), S=4%

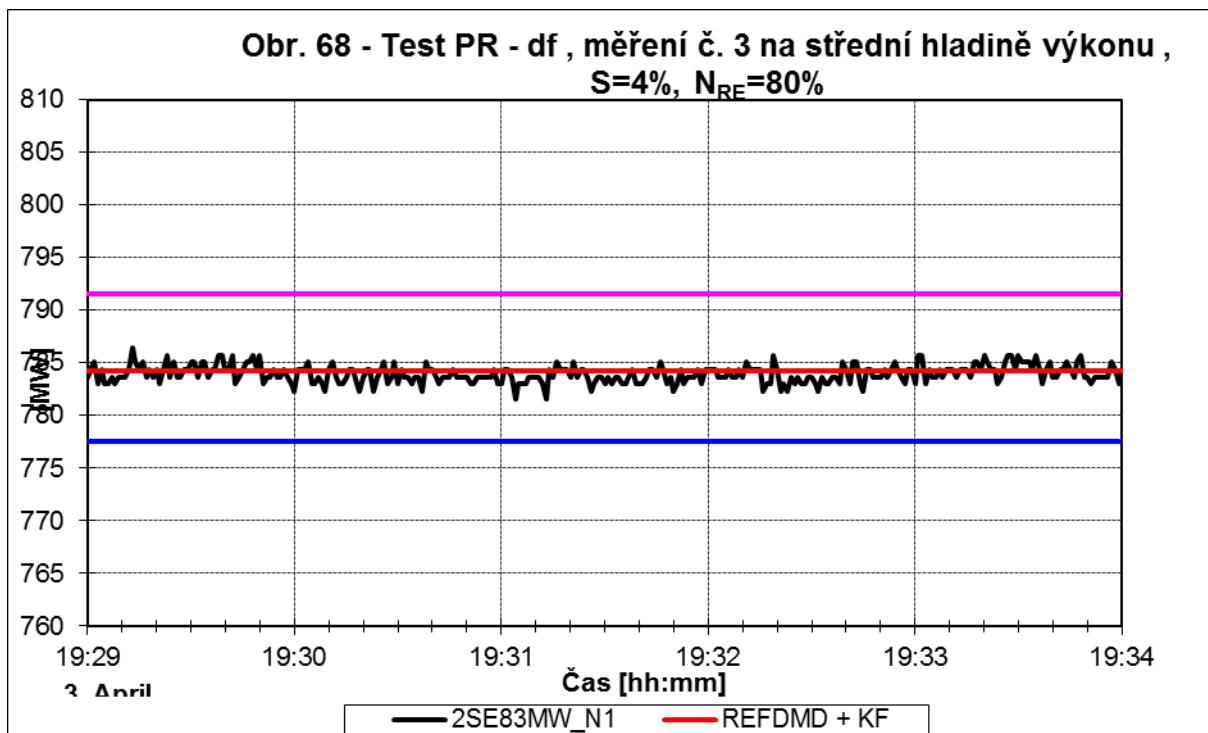
Obr. 67, 68, 69, 70. Test PR při imitaci změny otáček o ± 5 ot/min na střední hladině výkonu. Přechod a následný ustálený stav.



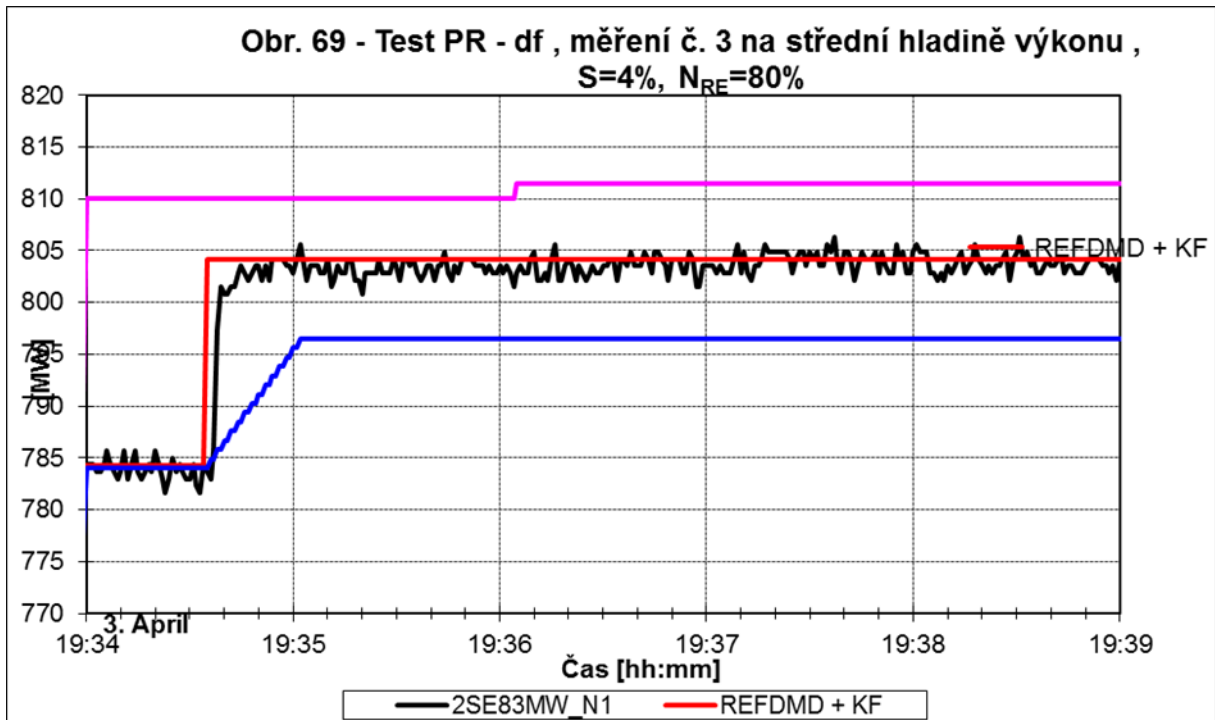
Obr. 67 Pokles výstupu z KORf (červená) a elektrického výkonu (černá čára)



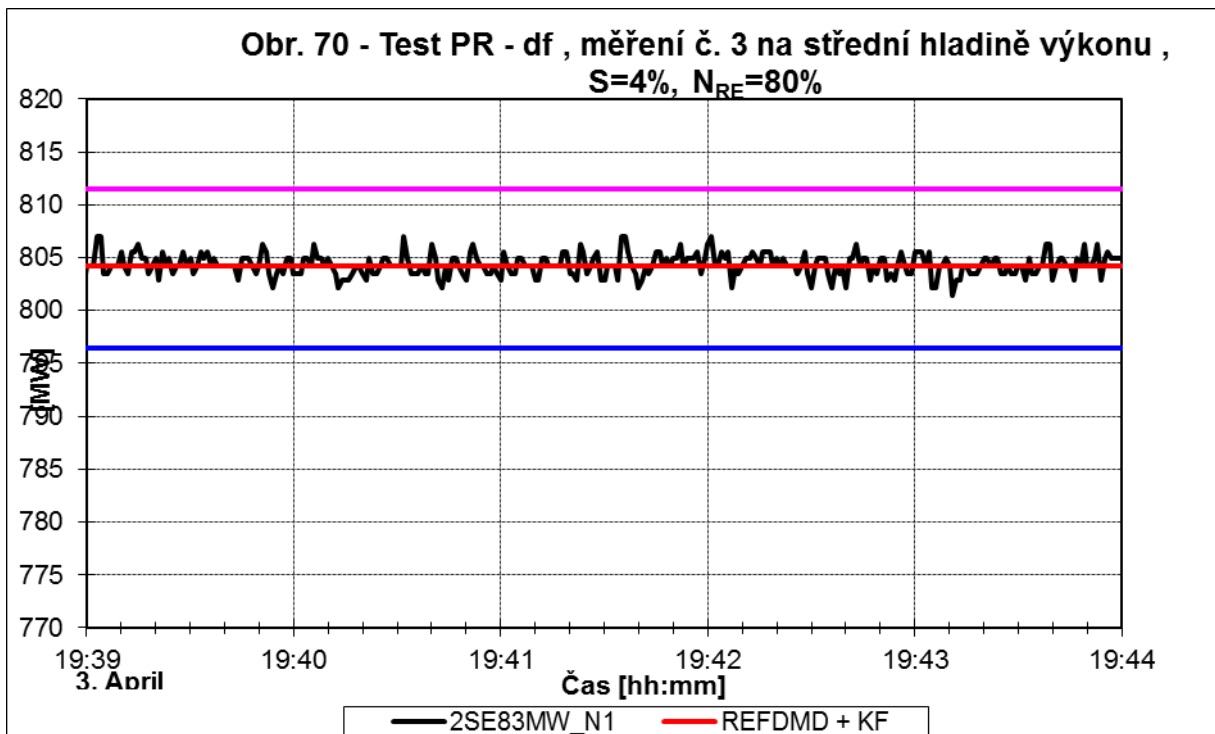
Na obr. 68 Výstup z KORf a elektrický výkon v ustálení po testu obr. 67



Obr. 69 Výstup z KORf i skutečný výkon generátoru testu po imitovaném snížení otáček TG o -5ot/min.



Obr. 70 Ustálený stav po testu z obr. 69



7.3 DISKUSE VÝSLEDKŮ TESTŮ

Nehledě na to, že měření na ETE v letech 2002 a 2003 byla prováděna pro získání certifikátu, výsledky posloužily i pro předkládaný rozbor. Z něho vyplývá, že schopnost uplatnění bloků VVER pro regulaci frekvence a předávaného výkonu v samoregulaci reaktoru je proměnlivá a v době provádění testů nemohla být uspokojivá z hlediska celkového průběhu režimu po simulovaných poruchách v síti. Akumulace tepla v kotlové vodě i v chladihu primárního okruhu i sama samoregulace reaktoru odchytky zvládla, ale za cenu větších změn tlaku v HPK a teploty. Proto do procesu, při některých testech, zasahovaly i regulátory hladiny v KO, tlaku v I.O., i regulátor výkonu reaktoru. Při současných cyklech (12, 13, 14 a dalších u temelínských reaktorů – obr. 7) jsou samoregulační schopnosti již od počátku cyklu větší než při testech na prvních vsázkách AZ (Obr. 6) ETE. Výsledky z testů podle programů 1E048/OP/01 a 2E048/OP/R0 proto mohly vést i ke skepsi.

Testy na prvních zavážkách (prvních dvou cyklech) AZ ETE poskytly certifikát pro PR. Počáteční samoregulační schopnosti těchto zón ale byly pod hranici možností daných počátečním poměrem teplotního a výkonového koeficientu. To bylo prokázáno teoretickým rozbohem uvedeným v prvních kapitolách této práce. Proto docházelo i k zásahům regulátoru reaktoru (viz tabulky 5 a 6).

Testy podle programů 1E048/OP/01 a 2E048/OP/R0 spočívající v cyklické, zhruba desetiminutové simulaci zvýšení a snížení otáček TG se srovnatelnou prodlevou mezi jednotlivými kroky nejsou charakteristické pro skutečné poruchy v síti. U skutečného režimu PR lze počítat s „měkčími“ odezvami parametrů dokonce i při nedodržení výše uvedených omezení.

Meze ± 20 MWel nastavené v korektoru frekvence při testech PR takřka bezprostředně po energetickém spouštění, byly pro počátek provozu první vsázky příliš vysoké. Samoregulační proces, v jehož průběhu nedojde k zásahu regulátoru reaktoru, ale dojde k aktivaci jiných regulátorů (např. regulátoru tlaku v kompenzátoru objemu) nelze za čistě samoregulační považovat. Kdyby byl před testem proveden fyzikální rozbor, který nyní předkládá tato práce, mohla být uvážena realizace testů PR až na dobu těsně před překládkou a výsledky mohly být mnohem lepší.

Během vyhořívání se samoregulační schopnost vsázky zvětšuje. Příčina je v rychlejším vzrůstu absolutní hodnoty teplotního efektu reaktivity se snižující se koncentrací H_3BO_3 v chladihu oproti mírnému růstu výkonového efektu reaktivity v závislosti na vyhoření. Jejich poměr „ κ_t “ se tedy zvětšuje.

Samoregulační schopnost 12. až 14. cyklu na 1. bloku ETE by se pohybovala od $\kappa_t = 47$ MWt/K na počátku až do 62 MWt/K na konci cyklu. U rovnovážných vsázek EDU jde o hodnotu $\kappa_t = 25$ na počátku až 35 MWt/K na konci cyklu, tedy hodnoty zhruba poloviční v porovnání s VVER 1000.

Pokud bychom si přáli využívat k regulaci frekvence a předávaného výkonu v plné samoregulaci na blocích, které ještě nemají zpětnovazební efekty rozvinuté, museli bychom

KORf nastavit na nižší maximální odchylku (meze), např. pouze na ± 10 MWel. Pokud by se ukázala potřeba, meze korektoru by bylo možné během kampaně čas od času (např. jednou za týden) postupně přestavovat, nebo vytvořit algoritmus, který by nevyužíval pevně nastavených mezí jiných parametrů. Těmito mezemi by mohl být tlak v HPK, např. $\pm 0,05$ MPa, nebo, lépe $\Delta p_{\text{HPK}} = \langle +0,0; -0,1 \rangle$ MPa.

Pro takovou změnu $p_{\text{HPK}} = \pm 0,05$ MPa (tj rozkmit $p_{\text{HPK}} \leq 0,1$ MPa) by při parametrech sekundárního okruhu ETE odpovídala změna teploty moderátoru $\sim \pm 0,5$ K (rozkmit 1K) a změna hladiny v KO $\sim \pm 5$ až 7,5 cm (rozkmit ≤ 15 cm). Tlak v KO by se měnil v rozmezí $< \pm 0,05$ MPa. Během takovýchto změn parametrů by nebyly do činnosti uvedeny regulátory hladiny v KO a tlaku v primárním okruhu a přechodové procesy by se odehrávaly zcela v samoregulačním režimu bloku, tj. bez potřeby zásahů žádného z regulátorů. Ze záznamů je vidět, že zejména regulátor tlaku rozkolísal parametry KO zapnutím elektroohříváků KO už při velmi malém snížení tlaku v primáru. Pásmo necitlivosti pro regulátor tlaku v I.O. na cca $\pm 0,05$ MPa by procesu pomohlo. Zapnutí EOKO hned na počátku přechodových dějů vedlo k divergentním změnám tlaku a hladiny v KO a tím k nevhodné (i protismyslné) funkci regulátorů těchto parametrů – na jedné straně zvyšování tlaku, vzápětí jeho potlačování. ...

Změny výkonu TG v odezvách na změny frekvence v síti byly prudší a větší při vlivnosti KORf rovné 500 MW/Hz v porovnání s vlivností KORf : 250 MW/Hz. Změny elektrického výkonu generátoru při nižší vlivnosti KORf byly pro regulaci příznivější.

8. SOUHRN

- Při fluktuaci spotřeby v síti lze očekávat změny výkonu TG 1000 MW díky jeho GD^2 většinou v mezích jen $\pm 1,5$ MWel. Záznamy z měření tuto skutečnost dokazují.
- Při hydraulické regulaci otáček by otáčkový regulátor přispíval k samoregulaci bloku příspěvkem ≤ -136 MWel/Hz. Při současné elektronické regulaci otáček temelínských turbín tento efekt není k dispozici.
- Pro výše uvedený příklad bloku s VVER 1000 se při snížení tlaku v HPK o $\Delta p_s = -0,1$ MPa celkově uvolní z naakumulované energie tepelná práce až 3311 MWs nezávisle na tom, jak rychle se naakumulované teplo uvolní.
- Díky zpětnovazebním efektům reaktivity vyjádřeným poměrem κ_t lze očekávat u rovnovážných vsázek temelínských bloků uvolnění 47 až 62 MWt/K v závislosti na vyhoření.
- Využití KORf s pevně nastavenými mezemi ± 20 MWel povede v závislosti na velikosti κ_t k režimům s různou velikostí poklesu tlaku v HPK (a tím i teploty varu v PG) a návazně k různě těžkým odezvám dalších parametrů (zejména tlaku v I.O. a hladiny v KO). U rovnovážných vsázek = při vysokých hodnotách κ_t , lze pro dosažení plné samoregulace bloku pracovat pouze s malými odchylkami tlaku v HPK.
- Příznivější režim pro stabilnější provoz se samoregulací by byl s KORf nastaveným na ± 10 MWel.

Režim primární regulace frekvence a předávaného výkonu znamená obvykle velmi rychlé, leč relativně malé a střídaté změny výkonu, a proto není příliš nutné se zabývat xenonovou otravou.

Podle očekávání byly změny výkonu TG prudší a větší při vlivnosti KORf rovné 500 MW/Hz. Nižší vlivnost KORf (250MW/Hz) se jeví pro změny elektrického výkonu generátoru příznivěji a spolu s nastavením nižších mezí lze očekávat příznivý průběh tohoto provozního režimu.

Pokud by TG pracoval s trvale zapnutým KORf připouštějícím změnu elektrického výkonu TG v mezích ± 10 MW (místo testovaných mezí ± 20 MW), docházelo by při rychlých vratných změnách v síti k rychlým změnám elektrického výkonu TG, k čerpání resp. akumulaci tepelného výkonu z naakumulované energie v kotlové vodě (v PG), aniž by se samotný neutronový výkon reaktoru musel měnit. Registrovány byly dlouhodobější vlny v průběhu 15 až 25 minut. Na nich jsou „nakmitány“ rychlé sekundové změny dané stochastickými změnami rovnováhy v síti. Takové změny vedou k uplatnění samoregulační schopnosti soustavy. To je vidět i na záznamech z ustáleného provozu při zapnutém KORf. Při takovém nastavení by při provozu na nominálním výkonu docházelo k relativně krátkodobému zvýšení/snížení neutronového výkonu – maximálně o $\pm 1\%$ (povolená mez je $\leq 102\%$), vlivem zpětnovazebních efektů.

Poznámka:

1. *Vzhledem k celkovým požadavkům evropské sítě na Českou republiku pokrývat služby primární regulace ve výšce 80 MW, by měl postačovat příspěvek jediného velkého jaderného bloku v mezích ± 10 MW.*

2. *Vlivnost nastavení korektoru frekvence může být v takovém režimu zachována, nebo snížena na polovinu: na -250 MW/Hz.*

Pro budoucí testy PR je vhodné doporučit:

- Nekonat testy PR pouze pro získání certifikátu.
- Před zahájením testů PR určit maximální skoky plně odregulovatelné samoregulací, tj. určit κ_t z fyzikálních vlastností aktivní zóny. Příprava nových testů primární regulace si zaslouží kromě přípravy testů automatik i fyzikální rozbor.
- Určit samoregulační schopnost zóny nejen teoreticky, ale ověřit ji i testem před samotným zahájením zkoušek PR.
- Nastavit vhodné necitlivosti regulátorů – (nejen tlaku v HPK, ale i tlaku v I.O. a hladiny v KO).
- Meze KORf nastavit na hodnoty odpovídající schopnostem vsázky paliva v daném čase, tj. podle velikosti měnícího se κ_t .
- Pro meze ± 20 MWel je vhodné, aby aktivní zóna měla $\kappa_t \geq 60$ MWt/K
- Pro meze ± 10 MWel postačuje, aby aktivní zóna měla $\kappa_t \geq 30$ MWt/K
- Během testů snímat teplotu studených a horkých větví zvlášť, nikoli pouze střední teplotu I.O. Bylo by snazší vyhodnotit časový rozvoj dějů v reaktoru.
- Snímat průtok napájecí vody a páry.
- Testy provádět až do ustálení děje.
- Pro lepší možnost vyhodnocení zaznamenávat nejdůležitější parametry N_{EI} , p_{HPK} , t_S , t_H , $t_{stř. I.O.}$, N_R , v jediném grafu.

9. EKONOMICKÁ ÚVAHA

Česká republika je vázána povinnostmi zajišťovat pro státy ENTSO-E služby primární regulace (PR) v sumě 80 MW po dobu celého roku (8760 hodin).

Cena za podpůrné služby PR je určována tržně na základě soutěže, kdy jednotlivé elektrárny (elektrárenské společnosti) službu nabízí za určitou cenu a pak jsou vybrány zdroje s nejnižší nabízenou cenou. Dosud se tato služba soutěží v rámci České republiky, je ale už připraveno nařízení Evropské komise, podle něhož se poskytování služeb bude soutěžit v rámci určitého evropského regionu.

Cena za službu PR je tedy pohyblivá a platí vždy pro jeden rok. V roce 2018 byla cena 670 Kč/MW.h, pro rok 2019 a 2020 se uvažuje 500 Kč/MW.h. Uvažujme celoroční PR službu temelínských bloků ± 10 MW. Při takové službě $8760 \text{ h} \times 10 \text{ MW} \times 500 \text{ Kč/MWh} = 43,8 \cdot 10^6 \text{ Kč}$. To je cena řádově srovnatelná s příjmem z výroby jednoho tisícimegawattového bloku za den (okolo $30 \cdot 10^6 \text{ Kč}$).

Pro službu PR se obvykle drží elektrický výkon bloku o nasmlouvanou hodnotu služby (uvažujme -10 MW elektrických, tj. o 1% elektrického výkonu temelínského generátoru) pod maximálním výkonem reaktoru. To má své ekonomické dopady do ztráty výroby: V současnosti lze vyrobenou elektrickou práci na trhu prodat za cca 50 €/MWh = 1250 Kč/MWh. Z toho variabilní náklady jsou u jaderné elektrárny nízké a činí cca 150 Kč/MWh. Při snížení výkonu o 1 MW elektricky by byly uspořeny palivové náklady 150 Kč/MWh, tedy ztráta z nevýroby $(1250 - 150) = 1100 \text{ Kč/MWh}$. Při platbě za službu PR 500 Kč/MWh by ekonomická ztráta dosáhla 600 Kč/MWh. Při celoročním provozu (vždy aspoň jeden z temelínských bloků) v režimu PR by ztráta z nevýroby v součtu s platbou za službu PR 10 MW dosáhla 52,6 milionů Kč. Takový způsob provozování by byl ekonomicky ztrátový a nelze ho pro podpůrnou službu PR doporučit.

Je samozřejmě otázkou, za jakou cenu bude vysoutěžena MWh v budoucnosti, až bude nedostatek podpůrných služeb z plynových či odstavených uhelných bloků.

Existuje ale jiný režim, bez ztráty výroby, naznačený v kapitole 6.3: Reaktor i TG pracují na 100% výkonu, TG s trvale zapnutým KORf připouštějícím krátkodobou změnu elektrického výkonu TG v mezích ± 10 MW (místo nastavených a testovaných mezí ± 20 MW). Vlivnost nastavení korektoru frekvence může být zachována, nebo snížena na polovinu: na -250 MW/Hz jak ukazuje červená křivka na obr. 23. Protože jeden blok není pro takovou službu připraven celoročně (pracuje maximálně 8000 hodin v roce), musely by se ve službě vystřídat dva bloky s posunutím služby v čase. Po určité roční období by však mohly poskytovat podpůrnou službu PR dva 1000 MW bloky souběžně. Při takovémto režimu provozování bloků by nedocházelo ke ztrátě příjmů z nevýroby v důsledku poskytování podpůrné služby primární regulace výkonu a platba za poskytovanou službu by byla čistým dodatečným výnosem poskytovatele. Bylo by však potřebné pro tento účel změnit provozní předpis a s SÚJB odsouhlasit provoz s občasným zvýšením výkonu reaktoru do 101%.

10. PŘÍNOS DIZERTACE

Předkládaná dizertace rozvinula práce [1] a [2]. V těchto pracích byly poprvé použity hodnoty κ_t , k demonstraci závislosti samoregulačních schopností reaktoru na vyhoření: pro VVER440 v roce 1982, pro VVER 1000 v roce 2014.

Práce dále

- přispěla k lepšímu pochopení procesů samoregulace jaderných bloků s tlakovodními reaktory využitelné pro primární regulaci frekvence a předávaného výkonu,
- objasňuje výsledky testů provedených na 1. + 2. bloku jaderné elektrárny Temelín,
- přispívá ke kvalifikované přípravě jaderných bloků pro účast ve službách výkonové rovnováhy, až se zvýší podíl výkonu jaderných bloků v české energetické soustavě a
- navrhuje nastavení regulátorů a KORf tak, aby bylo možné využívat samoregulační procesy bloku jako celku (nejen aktivní zóny) pro účely primární regulace

Při provozu více jaderných bloků je samozřejmě možné využívat součet schopností všech provozovaných bloků.

U bloků s vysokým poměrem κ_t bude možné přenosové soustavě nabídnout po dobu provozu bloku, i větší rozsah KORf, než $\pm 20\text{MWel}$.

LITERATURA

- [1] Hezoučký F: „Příspěvek k možnosti využití je s bloky VVER - 440 v režimu regulace frekvence a předávaného výkonu“ (vnitroelektrárenský dokument EDU, červen 1982)
- [2] Hezoučký F: „K možnosti využití je s bloky VVER 1000 v režimu regulace frekvence a předávaného výkonu“ (BJE 1-2 / 2014).
- [3] Reuss Paul: „Neutron physics“ (EDP Sciences 2008)
- [4] Leicman J.: Zapojení jaderných elektráren typu VVER do systému automatické regulace kmitočtu a výkonu (Kandidátská dizertační práce, VŠSE Plzeň 1983)
- [5] Podporogram pro zkoušky 1.bloku ETE pro jeho provoz v primární regulaci. ICE1/10619/TR/48/0213/Rev.0 z 11.9.2002. Závěrečné vyhodnocení dle programu 1E048/OP/01
- [6] Program zkoušky 2.bloku ETE v primární, sekundární a terciální regulaci) ICE3/10660/TD/2E048/0311/Rev.0 z 08/2003. Závěrečná zpráva ke zkouškám dle programu 2E048/R0
- [7] Salnikova T. (AREVA GmbH): Solution for flexible operation of VVERs (VVER 2016 Conference-Prague, November 1st, 2016)
- [8] KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY, část II, Podpůrné služby (ČEPS, březen 2016, Rev. 16)
- [9] Starý V.: Sdělení ke koeficientům reaktivity blok blok 1 ETE 12., 13., 14. cyklus (mail z ALVEL ze dne 22.8.2017)
- [10] Bajgl J.: Sdělení ke koeficientům reaktivity blok 1 EDU 32.cykus (mail z EDU ze dne 22.8.2017)
- [11] Fučík Z.: Sdělení k derivacím frekvence v ES (mail ze dne 4.9.2018)
- [12] Ludwig H., Salnikova T, Stockman Andrew and Waas Ulrich: „Load Cycling Capabilities of German Nuclear Power Plants (NPP)“ ATW Volume 55 (2010) Issue 8/9 August/September (International Journal for Nuclear Power)
- [13] Švec: Regulace činného výkonu a frekvence v ES (VUT 04/2017)
- [14] Bíca M.: Křivky pro regulátor reaktoru ETE

- [15] В.И.Владимиров: Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов (Атомиздат 1976)
- [16] Heřmanský B.: Dynamika jaderných reaktorů (1987, 1. vyd, česky, VN MON, Praha,)
- [17] Heřmanský B.: Termomechanika reaktorů (1987, 1. vyd, česky, ČVUT, Praha)
- [18] Leicman J., Chreňo J: „Regulácia jadrových elektrární“ (Studie UJI 1990)
- [19] Certifikát PR/JE 1.bloku JE Temelín (ICE1/10660/PR/0204, 2002)
- [20] Certifikát PR/JE 2.bloku JE Temelín (ICE3/10660/PR/0303, 2003)
- [21] Kolektiv autorů: Trh s elektřinou (Asociace energetických manažerů, Praha 2016 druhé aktualizované vydání)
- [22] Hezoučký F., Štech S.: Základy normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory (ZČU Plzeň, 2015).

PŘÍLOHA 1: ZÁKLADNÍ PROJEKTOVÉ PARAMETRY I.O. A PG ETE POTŘEBNÉ PRO PŘEDKLÁDANOU STUDII – PŮVODNÍ (PROJEKTOVÝ) VÝKON 1000 MW_{EL}

Primární okruh:

Pracovní tlak v I.O	15,7 MPa
Teplota chladiva na vstupu do aktivní zóny	290 °C
Teplota na výstupu z aktivní zóny	320 °C
Průtok chladiva reaktorem	88000 m ³ /h (minimum 83000, maximum 91000)

Parogenerátor

Vstupní/výstupní teplota na primární straně	320/290 °C
Vstupní/výstupní teplota na sekundární straně	220/278,5 °C
Tlak	≤6,3 MPa
Množství vyrobené páry	1 470 t/h

PŘÍLOHA 2: PŘEVZATO Z MODIFIKACE C953 – MODIFIKACE

NASTAVENÍ RCLS V RÁMCI PROJEKTU VPR (B718) (Pozn.: Projekt VPR B718 došlo ke zvýšení nominálního výkonu reaktoru z 3000 na 3120 MWt)

TEMELÍN POWER UPRATE PROJECT

Definition of Mode K Operating Curves

1. Basis for Mode K Operating Curves

The design purpose of the K curves is to optimize the control of main parameters (MSC pressure, RCS average temperature) during load changes. The basis for the setting of individual K curves were defined within the Škoda / EGP basic design. Curve K5 was further optimized by ČEZ to minimize CL temperature during power elevation. The power uprate project preserves the basis of the individual K curves. The new K curves must however be adjusted to fit into the working area region defined for the power uprate. With the exception of K5, all K curves designed for the power uprate project will reach 5,98 MPa-g on 100% power (nominal MSC pressure for 3120 MWt).

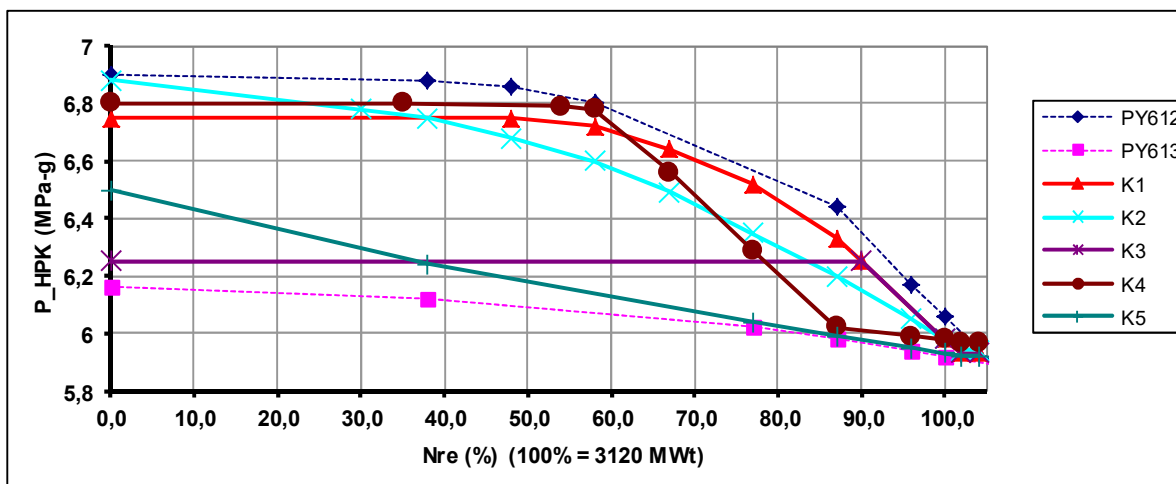
Summary – purpose of individual K curves, approach adopted for the power uprate project:

K curve	Purpose	Note
K1	Load-follow (primary / secondary control) in the power region of approx. 90 ÷ 100% - provides constant RCS avg. temperature control in this region. Supports also tertiary load control in the power region of approx. 60 ÷ 100% or corresponding load changes.	Original K1 slightly modified to optimally utilize the new working area.
K2	„Compromise“ mode for power changes (shutdown, startup) over entire power range 0 ÷ 100%. Supports also tertiary load control.	Original K2 slightly modified to fit into the new working area.
K3	Unit power ascension (startup). Provides constant RCS avg. temperature control in the power region close to Nnom (i.e. also suitable for load-follow between 90 ÷ 100%).	Original K3 slightly modified to expand the constant avg. temperature region down to 90%.
K4	Load changes in the interim power region - provides constant RCS avg. temperature control in the power region of approx. 55 ÷ 85%.	Original K4 slightly modified to fit into the new working area.
K5	Power elevation from low power levels to 100%. K5 has been optimized by ČEZ based on operating experience. It is shaped to minimize CL temperature during power elevation (intended for plant startup after outage primarily to avoid conflict with LCO A.3.4.1). Although current LCO A.3.4.1 (based on TVEL/ÚJV safety analysis) provides enough margin for normal operating conditions, the existing basis for K5 will be preserved.	Current (i.e. tuned by ČEZ) K5 slightly modified to fit into the new working area.

2. Recommended Control Coordinator Settings for the Mode K Operating Curves (CC PY631 ÷ PY635)

The recommended new settings of the Mode K curves are introduced in the table below. Both the table and chart use the following scaling of reactor power (X axis): **100% = 3120 MWt**.

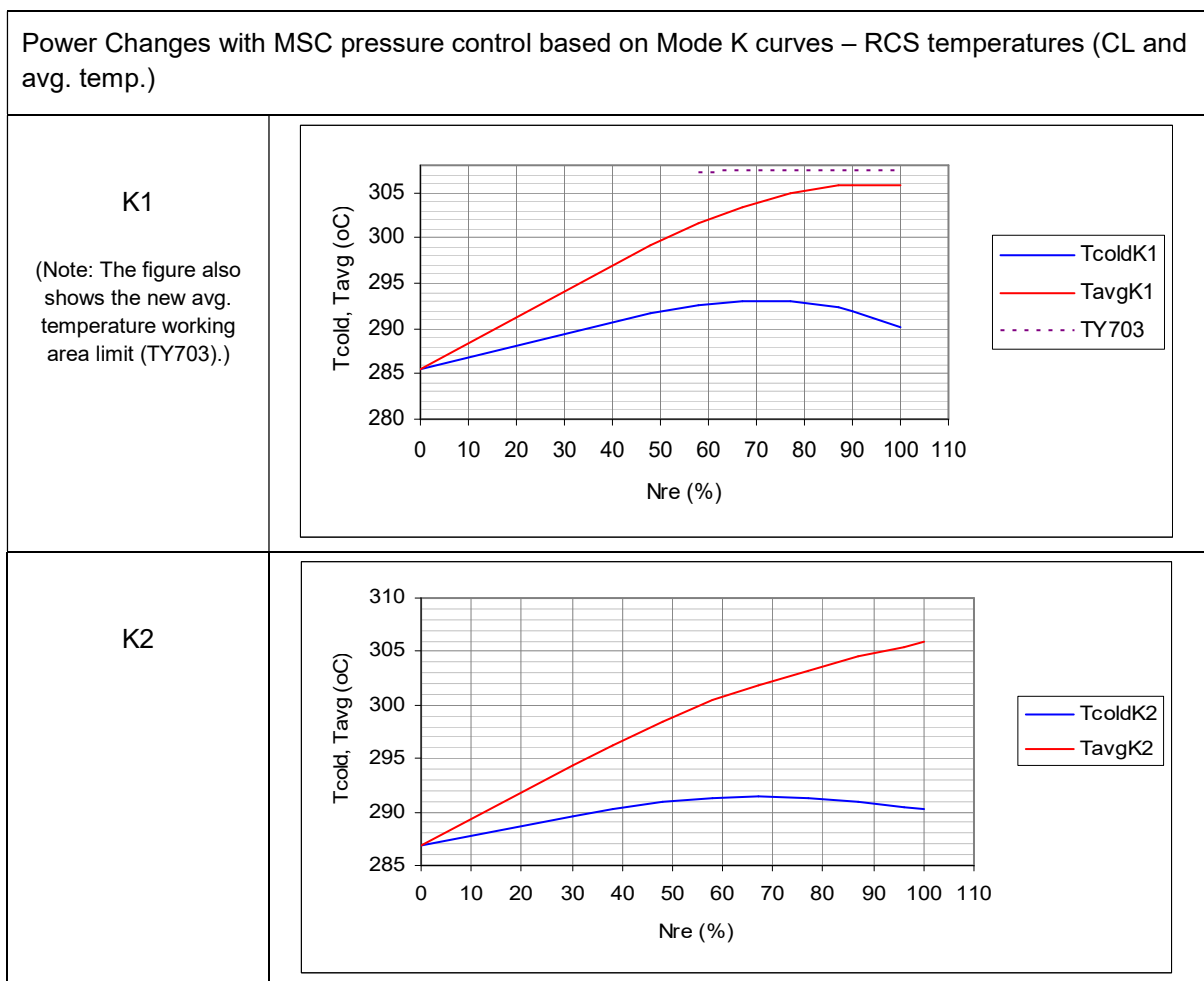
Reactor Power (%)	PY631 (MPa-g) K1	PY632 (MPa-g) K2	PY633 (MPa-g) K3	PY634 (MPa-g) K4	PY635 (MPa-g) K5
0,0	6,75	6,88	6,25	6,8	6,5
30,0		6,78			
35,0				6,8	
38,0		6,75			6,24
48,0	6,75	6,68			
54,0				6,79	
58,0	6,72	6,6		6,78	
67,0	6,64	6,49		6,56	
77,0	6,52	6,35		6,29	6,04
87,0	6,33	6,2		6,02	5,99
90,0	6,25		6,25		
96,0		6,05		5,99	5,95
100,0	5,98	5,98	5,98	5,98	5,93
102,0	5,93	5,94	5,93	5,97	5,92
104,0	5,93	5,94	5,93	5,97	5,92

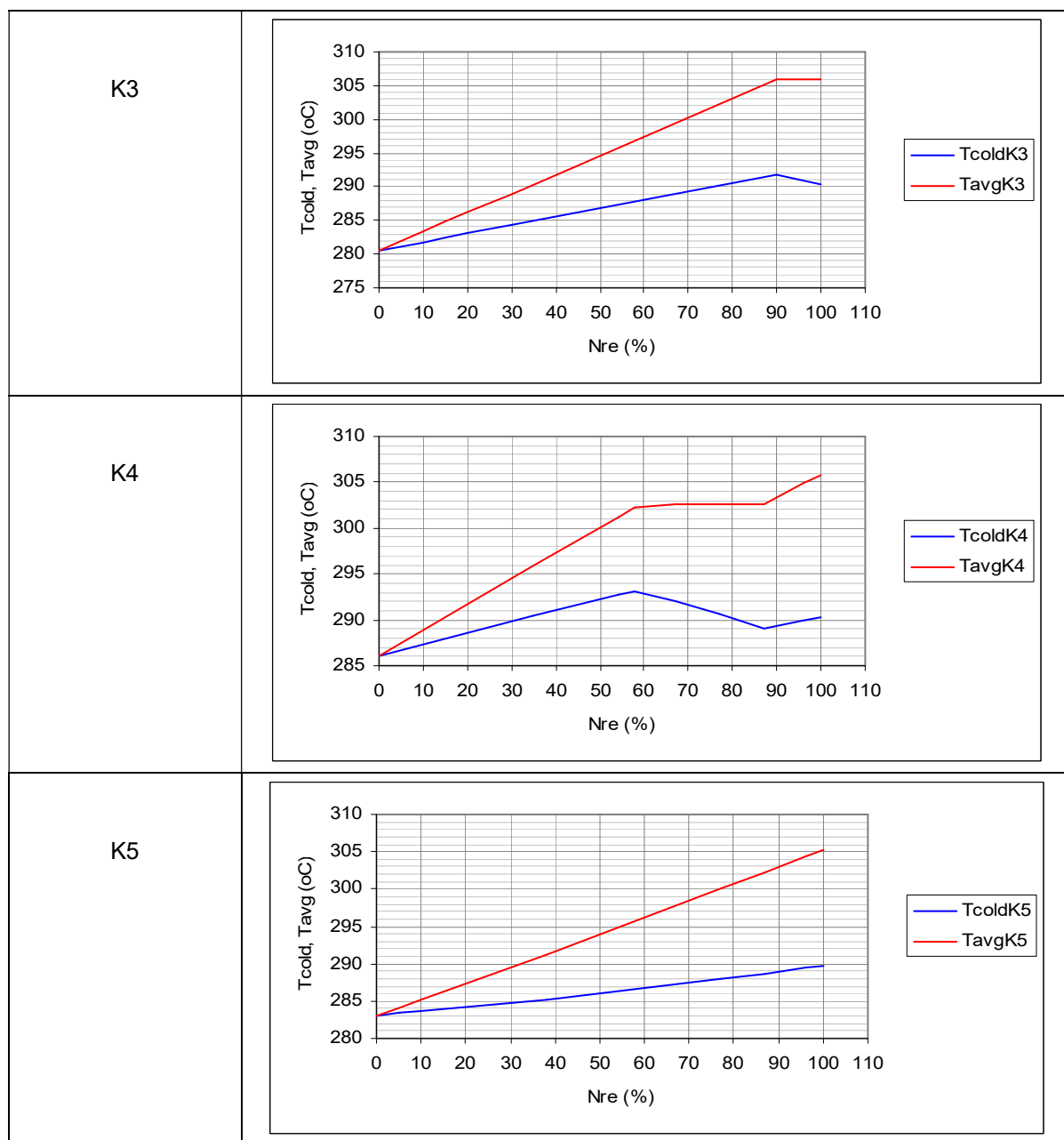


3. Power Changes with Mode K Curves – Main Parameters

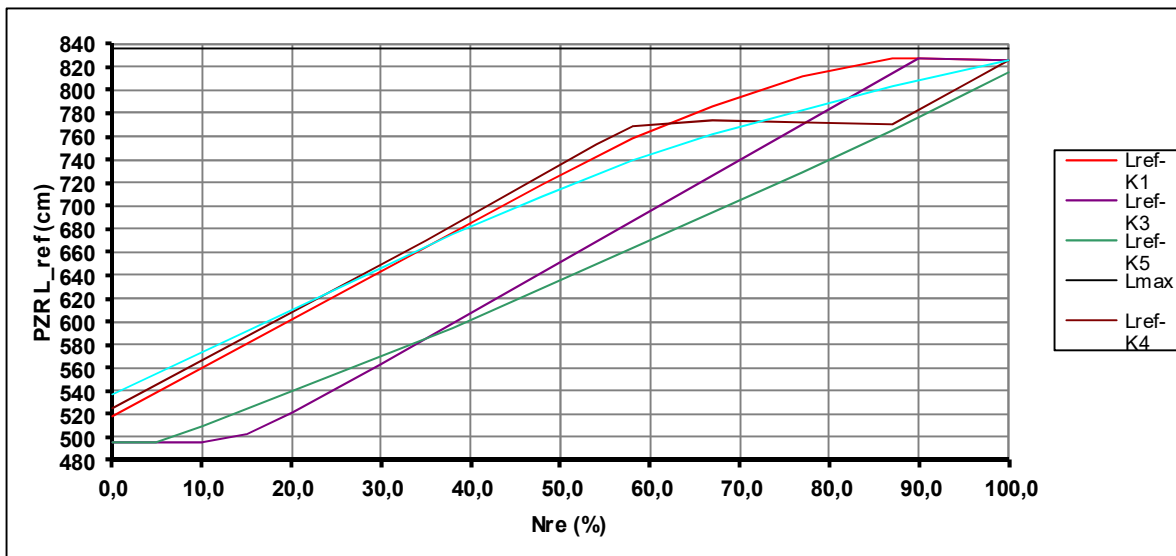
The figures below show the course of the RCS temperatures (CL and avg. temp.) and the course of the PZR reference level during power changes in the region of 0 ÷ 100% Nnom. The scaling of the X-axis (reactor power) is 100% = 3120 MWt.

Reference density used in the PZR reference level calculation was 758 kg/m³. Maximum PZR reference level setpoint is 835,8 cm (power uprate project modification).





Pressurizer reference level during power changes in the region of $0 \div 100\%$ Nnom on Mode K curves



ПРИЛОГА 3 ЗМЭНЫ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВЭНЕМ ВЫНОРИВЭНИ 1., 2., А 3. ЗАВЭЖКЫ ВВЕР1200

Обозначения и сокращения

BOC	– Момент начала кампании, эфф. сут
\bar{B}	– Среднее выгорание топлива в активной зоне, МВт·сут/kgU (MW*day/kgU)
$\partial\rho/\partial\gamma$	– Коэффициент реактивности по плотности теплоносителя, 1/(г/см ³)
$\partial\rho/\partial t_M$	– Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя, 1/(°C)
$\partial\rho/\partial t_U$	– Коэффициент реактивности по распределенной температуре топлива, 1/(°C)
$\partial\rho/\partial t_{U^*}$	– Коэффициент реактивности по средней температуре топлива, 1/(°C)
$\partial\rho/\partial N_B$	– Мощностной (полный) коэффициент реактивности, 1/(МВт)
$\partial\rho/\partial N_U$	– Мощностной (Допплер) коэффициент реактивности, 1/(МВт)
$\partial\rho/\partial N_{KB}$	– Коэффициент реактивности по мощности реактора с учетом подогрева теплоносителя при неизменной средней температуре в активной зоне, 1/(МВт)
$\partial\rho/\partial C$	– Коэффициент реактивности по концентрации борной кислоты, 1/(г/кг)
$\beta_{y\acute{o}o}$	– Эффективная доля запаздывающих нейтронов
$C_{H_3BO_3}$	– Концентрация жидкого поглотителя (борной кислоты) в теплоносителе, г/кг
$C_{H_3BO_3}^{крит}$	– Критическая концентрация жидкого поглотителя (борной кислоты) в теплоносителе, г/кг
BUR	– Выгорание расчетного объема твэла
EOBC	– Момент окончания кампании при работе на номинальной мощности, эфф. сут
EOC	– Момент окончания кампании, эфф. сут
G	– Расход теплоносителя через активную зону, м ³ /ч
$H_{упр}$	– Положение ОР СУЗ (расстояние от нижнего торца ОР до низа активной зоны), см
H_i	– Положение <i>i</i> -ой группы ОР СУЗ
Ha.з.	– Принятая в расчетах высота активной зоны, см
Kq	– Максимальное значение относительной мощности ТВС
Kr	– Максимальное значение относительной мощности твэлов
Kv	– Максимальное значение относительной мощности расчетных объемов ТВС
l	– Время жизни мгновенных нейтронов, с
M	– Номер расчетного состояния
Nk	– Номер ТВС с максимальным значением относительной мощности
Nz	– Номер объема в ТВС с максимальным значением относительной мощности расчетных объемов
PSI	– Значение относительной мощности расчетных объемов твэла
Sim	– Признак расчетного сектора симметрии активной зоны: 60 - рассчитывается сектор симметрии 60°; 120 - рассчитывается сектор симметрии 120°; 360 - рассчитывается вся активная зона

- Sm – Признак учета отравления самарием:
0 - расчет без отравления;
1 - рассчитывается стационарное отравление:
- при расчете выгорания загрузки учитывается нестационарное отравление, исходя из заданных начальных распределений концентрации прометия и самария;
- при расчете выгорания загрузки учитывается нестационарное отравление, исходя из заданного начального распределения самария (в начале кампании моделируется полный распад прометия в самарий);
- при расчете выгорания загрузки учитывается нестационарное отравление, исходя из заданного начального распределения самария (в конце кампании моделируется полный распад прометия в самарий);
-1 - используется распределение концентрации самария, рассчитанное в предыдущем состоянии;
-2 - используется распределение концентрации самария, полученное на данный момент времени при расчете выгорания загрузки
- T – Момент кампании, эфф. сут
- t_{ex} – Температура теплоносителя на входе в активную зону, °C
- t_{ex}^{30} – Температура теплоносителя на входе в активную зону после 30 эфф. сут работы на пониженных параметрах, °C
- $T_{эфф.}$ – Момент кампании, эфф. сут
- W – Тепловая мощность реактора, МВт
- $W_{ном}$ – Номинальная тепловая мощность реактора, МВт
- Xe – Признак учета отравления ксеноном:
0 - расчет без отравления;
1 - рассчитывается стационарное отравление;
- 1 - используется распределение концентрации ксенона, рассчитанное в предыдущем состоянии;
- 2 - используется распределение концентрации ксенона, полученное на данный момент времени при расчете выгорания загрузки

F. Hezoučkový: Samoregulace jaderných bloků s tlakovodními reaktory využitelná pro primární regulaci frekvence a předávaného výkonu

Tabulka 3.1.1 – Změna charakteristik aktivní zóny VVER 1200 během vyhořívání první palivové vsázky

Xe = 1, Sm = 3																							
№	T _{суп.} сyt.	H _{упр.} см	t _{нз.} °C	W МВт	C _{крит.} г/кг	G 10 ⁻² м ³ /час	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	\bar{B} МВт*сут /кг U	$\partial\rho/\partial\gamma$	$d\rho/dt_M$	$\partial\rho/\partial t_U$	$\partial\rho/\partial t_U^*$	$\partial\rho/\partial N_U$	$\partial\rho/\partial N_B$	$\partial\rho/\partial N_{KB}$	$\partial\rho/\partial C$	$\beta_{суп.}$ *10 ²	l *10 ⁵ сек
														10 ⁻² 1/(г/см ³)	10 ⁻⁵ °C ⁻¹	10 ⁻⁵ °C ⁻¹	10 ⁻⁵ °C ⁻¹	10 ⁻⁵ МВт ⁻¹	10 ⁻⁵ МВт ⁻¹	10 ⁻⁵ МВт ⁻¹	10 ⁻² 1/(г/кг)		
1	0,0	336,6	298,2	3200	5,39	834,	360	1,189	55	1,642	18	11	0,00	6,56	-19,81	-2,51	-2,10	-0,27	-0,42	-0,33	-1,89	0,74	3,04
2	20,0	336,6	298,2	3200	4,87	834,	360	1,227	97	1,665	67	12	0,84	7,28	-20,37	-2,53	-2,15	-0,27	-0,42	-0,32	-1,87	0,72	3,04
3	40,0	336,6	298,2	3200	4,68	834,	360	1,245	55	1,640	109	11	1,67	8,05	-21,08	-2,55	-2,19	-0,27	-0,42	-0,32	-1,84	0,71	3,00
4	60,0	336,6	298,2	3200	4,43	834,	360	1,247	109	1,575	70	11	2,51	9,34	-23,34	-2,55	-2,24	-0,27	-0,43	-0,31	-1,82	0,69	2,96
5	80,0	336,6	298,2	3200	4,14	834,	360	1,244	97	1,517	55	10	3,34	10,79	-26,20	-2,55	-2,28	-0,26	-0,44	-0,31	-1,80	0,68	2,93
6	100,0	336,6	298,2	3200	3,83	834,	360	1,240	97	1,476	67	10	4,18	12,26	-29,24	-2,56	-2,33	-0,26	-0,45	-0,31	-1,79	0,66	2,91
7	120,0	336,6	298,2	3200	3,52	834,	360	1,234	55	1,451	94	9	5,02	13,67	-32,22	-2,58	-2,37	-0,26	-0,47	-0,31	-1,77	0,65	2,89
8	140,0	336,6	298,2	3200	3,21	834,	360	1,229	55	1,436	109	8	5,85	15,01	-35,09	-2,60	-2,41	-0,26	-0,48	-0,31	-1,76	0,64	2,87
9	160,0	336,6	298,2	3200	2,91	834,	360	1,223	67	1,428	97	8	6,69	16,22	-37,74	-2,63	-2,44	-0,26	-0,49	-0,31	-1,75	0,63	2,86
10	180,0	336,6	298,2	3200	2,63	834,	360	1,217	55	1,448	137	8	7,52	17,31	-40,14	-2,66	-2,48	-0,26	-0,51	-0,31	-1,75	0,61	2,85
11	200,0	336,6	298,2	3200	2,36	834,	360	1,210	55	1,478	152	8	8,36	18,28	-42,31	-2,69	-2,51	-0,26	-0,52	-0,31	-1,74	0,60	2,84
12	220,0	336,6	298,2	3200	2,09	834,	360	1,208	27	1,485	10	8	9,20	19,22	-44,48	-2,72	-2,54	-0,26	-0,53	-0,31	-1,73	0,59	2,83
13	240,0	336,6	298,2	3200	1,80	834,	360	1,218	154	1,462	27	7	10,03	20,23	-46,96	-2,73	-2,57	-0,26	-0,55	-0,31	-1,73	0,59	2,84
14	260,0	336,6	298,2	3200	1,48	834,	360	1,222	137	1,418	27	6	10,87	21,35	-49,83	-2,75	-2,61	-0,26	-0,56	-0,32	-1,74	0,58	2,85
15	280,0	336,6	298,2	3200	1,14	834,	360	1,221	154	1,378	27	6	11,70	22,57	-52,94	-2,77	-2,64	-0,26	-0,58	-0,32	-1,74	0,57	2,87
16	300,0	336,6	298,2	3200	0,78	834,	360	1,217	154	1,385	154	23	12,54	23,83	-56,14	-2,79	-2,67	-0,26	-0,60	-0,32	-1,75	0,56	2,89
17	320,0	336,6	298,2	3200	0,41	834,	360	1,211	154	1,387	137	24	13,38	25,12	-59,34	-2,81	-2,70	-0,26	-0,62	-0,33	-1,76	0,56	2,91
18	340,0	336,6	298,2	3200	0,04	834,	360	1,204	10	1,375	137	25	14,21	26,40	-62,50	-2,83	-2,73	-0,26	-0,63	-0,33	-1,77	0,55	2,94
19	342,1	336,6	298,2	3200	0,00	834,	360	1,204	27	1,374	27	25	14,30	26,54	-62,84	-2,83	-2,73	-0,26	-0,64	-0,33	-1,77	0,55	2,94

F. Hezoučký: Samoregulace jaderných bloků s tlakovodními reaktory využitelná pro primární regulaci frekvence a předávaného výkonu

Tabulka 3.1.2 – Změna charakteristik aktivní zóny VVER 1200 během vyhořívání druhé palivové vsázky

Xe = 1 , Sm = 3																							
№	T _{суп.} сyt.	H _{вып.} см	t _{вз.} °C	W МВт	C _{нп.р.} г/кг	G 10 ⁻² м ³ /час	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	B̄ МВт*сут /кгU	$\frac{\partial \rho}{\partial \gamma}$	$\frac{\partial \rho}{\partial t_M}$	$\frac{\partial \rho}{\partial t_U}$	$\frac{\partial \rho}{\partial t_U^*}$	$\frac{\partial \rho}{\partial N_U}$	$\frac{\partial \rho}{\partial N_B}$	$\frac{\partial \rho}{\partial N_{KB}}$	$\frac{\partial \rho}{\partial C}$	$\beta_{суп.}$ *10 ²	l *10 ⁵ сек
														10 ⁻² 1/(г/см ³)	10 ⁻⁵ °C ⁻¹	10 ⁻⁵ °C ⁻¹	10 ⁻⁵ °C ⁻¹	10 ⁻⁵ МВт ⁻¹	10 ⁻⁵ МВт ⁻¹	10 ⁻⁵ МВт ⁻¹	10 ⁻² 1/(г/кг)		
1	0,0	336,6	298,2	3200	6,85	834,	360	1,283	38	1,485	52	22	10,71	11,97	-28,61	-2,71	-2,46	-0,26	-0,47	-0,33	-1,29	0,64	2,06
2	20,0	336,6	298,2	3200	6,50	834,	360	1,285	112	1,483	133	23	11,55	12,83	-30,59	-2,74	-2,50	-0,26	-0,48	-0,33	-1,30	0,63	2,07
3	40,0	336,6	298,2	3200	6,04	834,	360	1,290	52	1,463	106	23	12,38	14,03	-33,51	-2,76	-2,53	-0,26	-0,49	-0,33	-1,31	0,63	2,09
4	60,0	336,6	298,2	3200	5,61	834,	360	1,295	52	1,448	112	6	13,22	15,20	-36,37	-2,77	-2,56	-0,26	-0,51	-0,33	-1,32	0,62	2,11
5	80,0	336,6	298,2	3200	5,19	834,	360	1,301	52	1,472	112	6	14,06	16,34	-39,15	-2,79	-2,59	-0,26	-0,52	-0,33	-1,33	0,61	2,13
6	100,0	336,6	298,2	3200	4,78	834,	360	1,308	31	1,496	112	6	14,89	17,41	-41,79	-2,82	-2,62	-0,26	-0,54	-0,33	-1,34	0,61	2,15
7	120,0	336,6	298,2	3200	4,39	834,	360	1,318	52	1,521	112	6	15,73	18,42	-44,26	-2,84	-2,64	-0,26	-0,55	-0,33	-1,35	0,60	2,16
8	140,0	336,6	298,2	3200	4,02	834,	360	1,330	31	1,548	112	6	16,57	19,34	-46,50	-2,86	-2,66	-0,26	-0,56	-0,33	-1,36	0,60	2,18
9	160,0	336,6	298,2	3200	3,66	834,	360	1,339	112	1,569	112	6	17,40	20,22	-48,65	-2,88	-2,68	-0,26	-0,57	-0,33	-1,37	0,59	2,20
10	180,0	336,6	298,2	3200	3,30	834,	360	1,340	133	1,573	52	5	18,24	21,11	-50,86	-2,90	-2,70	-0,26	-0,59	-0,33	-1,38	0,59	2,22
11	200,0	336,6	298,2	3200	2,93	834,	360	1,331	112	1,557	31	5	19,08	22,09	-53,33	-2,91	-2,72	-0,26	-0,60	-0,34	-1,39	0,58	2,23
12	220,0	336,6	298,2	3200	2,54	834,	360	1,316	112	1,527	31	5	19,91	23,19	-56,12	-2,93	-2,74	-0,26	-0,62	-0,34	-1,40	0,58	2,25
13	240,0	336,6	298,2	3200	2,13	834,	360	1,301	133	1,496	31	5	20,75	24,37	-59,15	-2,94	-2,76	-0,26	-0,63	-0,34	-1,42	0,57	2,27
14	260,0	336,6	298,2	3200	1,71	834,	360	1,288	112	1,472	31	5	21,59	25,59	-62,28	-2,95	-2,78	-0,26	-0,65	-0,34	-1,43	0,57	2,30
15	280,0	336,6	298,2	3200	1,28	834,	360	1,279	31	1,454	31	5	22,42	26,83	-65,46	-2,96	-2,79	-0,26	-0,67	-0,34	-1,44	0,57	2,32
16	300,0	336,6	298,2	3200	0,85	834,	360	1,273	55	1,443	112	5	23,26	28,07	-68,61	-2,98	-2,81	-0,26	-0,69	-0,35	-1,45	0,56	2,35
17	320,0	336,6	298,2	3200	0,42	834,	360	1,270	67	1,435	133	4	24,10	29,31	-71,73	-2,99	-2,83	-0,26	-0,70	-0,35	-1,46	0,56	2,37
18	339,9	336,6	298,2	3200	0,00	834,	360	1,267	55	1,425	133	4	24,93	30,54	-74,85	-3,01	-2,84	-0,26	-0,72	-0,35	-1,47	0,55	2,40

Tabulka 3.1.3 – Změna charakteristik aktivní zóny VVER 1200 během vyhořívání třetí palivové vsázky

																		Xe = 1 , Sm = 3					
№	T _{ср.} сут.	H _{вып.} см	t _{вх.} °C	W МВт	C _{ср.} г/кг	G 10 ⁻² м ³ /час	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	B̄ МВт*сут /кг U	∂ρ/∂γ 10 ⁻² 1/(г/см ³)	dρ/dt _к 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	∂ρ/∂t _т 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	∂ρ/∂t _{т*} 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	∂ρ/∂N _У 10 ⁻⁵ МВт ⁻¹	∂ρ/∂N _В 10 ⁻⁵ МВт ⁻¹	∂ρ/∂N _{КВ} 10 ⁻⁵ МВт ⁻¹	∂ρ/∂C 10 ⁻² 1/(г/кг)	β _{ср.} *10 ⁵	l *10 ⁵ сек
1	0,0	336,6	298,2	3200	7,47	834,	360	1,299	50	1,541	10	11	18,29	13,60	-32,95	-2,87	-2,52	-0,27	-0,51	-0,35	-1,18	0,63	1,87
2	20,0	336,6	298,2	3200	7,03	834,	360	1,309	134	1,491	134	14	19,12	14,51	-35,14	-2,90	-2,56	-0,27	-0,52	-0,35	-1,19	0,63	1,89
3	40,0	336,6	298,2	3200	6,51	834,	360	1,295	65	1,474	10	9	19,96	15,75	-38,25	-2,91	-2,58	-0,27	-0,54	-0,35	-1,20	0,62	1,91
4	60,0	336,6	298,2	3200	6,02	834,	360	1,283	10	1,481	50	8	20,80	16,96	-41,33	-2,92	-2,61	-0,27	-0,55	-0,35	-1,21	0,62	1,92
5	80,0	336,6	298,2	3200	5,54	834,	360	1,292	10	1,488	154	7	21,63	18,14	-44,30	-2,93	-2,63	-0,27	-0,57	-0,35	-1,22	0,61	1,94
6	100,0	336,6	298,2	3200	5,07	834,	360	1,301	67	1,499	154	7	22,47	19,27	-47,16	-2,95	-2,65	-0,27	-0,59	-0,36	-1,23	0,61	1,96
7	120,0	336,6	298,2	3200	4,62	834,	360	1,317	67	1,512	154	7	23,31	20,34	-49,86	-2,96	-2,67	-0,27	-0,60	-0,36	-1,24	0,60	1,98
8	140,0	336,6	298,2	3200	4,19	834,	360	1,337	67	1,527	154	7	24,14	21,33	-52,36	-2,98	-2,69	-0,27	-0,62	-0,36	-1,25	0,60	1,99
9	160,0	336,6	298,2	3200	3,78	834,	360	1,354	67	1,548	154	6	24,98	22,27	-54,74	-2,99	-2,70	-0,27	-0,63	-0,36	-1,26	0,59	2,01
10	180,0	336,6	298,2	3200	3,37	834,	360	1,363	97	1,566	154	6	25,82	23,22	-57,16	-3,01	-2,72	-0,27	-0,65	-0,37	-1,28	0,59	2,03
11	200,0	336,6	298,2	3200	2,95	834,	360	1,358	97	1,578	10	6	26,65	24,21	-59,72	-3,02	-2,73	-0,27	-0,67	-0,37	-1,29	0,58	2,05
12	220,0	336,6	298,2	3200	2,52	834,	360	1,366	154	1,577	10	6	27,49	25,27	-62,48	-3,02	-2,75	-0,27	-0,68	-0,37	-1,30	0,58	2,07
13	240,0	336,6	298,2	3200	2,08	834,	360	1,371	154	1,566	10	5	28,33	26,39	-65,38	-3,03	-2,76	-0,27	-0,70	-0,38	-1,31	0,58	2,09
14	260,0	336,6	298,2	3200	1,64	834,	360	1,372	154	1,553	10	5	29,16	27,54	-68,36	-3,04	-2,78	-0,27	-0,72	-0,38	-1,32	0,57	2,11
15	280,0	336,6	298,2	3200	1,18	834,	360	1,368	10	1,540	10	5	30,00	28,71	-71,37	-3,05	-2,79	-0,27	-0,74	-0,38	-1,33	0,57	2,13
16	300,0	336,6	298,2	3200	0,73	834,	360	1,363	10	1,528	154	5	30,84	29,88	-74,36	-3,06	-2,81	-0,27	-0,76	-0,39	-1,34	0,56	2,16
17	320,0	336,6	298,2	3200	0,27	834,	360	1,357	10	1,518	154	5	31,67	31,06	-77,34	-3,07	-2,82	-0,28	-0,77	-0,39	-1,35	0,56	2,18
18	332,3	336,6	298,2	3200	0,00	834,	360	1,353	10	1,512	154	5	32,19	31,77	-79,15	-3,08	-2,83	-0,28	-0,78	-0,39	-1,36	0,56	2,19