

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

УДК 621.311.661

М.М. КУЛИК, академік НАН України, доктор техн. наук, професор,
І.В. ДРЬОМІН, канд. техн. наук, Інститут загальної енергетики НАН
України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03680, Україна

УЗАГАЛЬНЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ І ПОТУЖНОСТІ

Розроблено узагальнену модель процесів автоматичного регулювання частоти і потужності (АРЧП) в об'єднаних енергосистемах, яка надає можливість досліджень систем АРЧП з використанням генераторів-регуляторів, споживачів-регуляторів та адаптивних систем АРЧП. Моделі адаптивних систем АРЧП сформовані з використанням універсальних моделей АРЧП, розроблених раніше авторами [3, 4], шляхом введення в регулюючі функції адаптивних складових, які синтезовані на основі рівнянь балансу потужності в енергосистемі. З використанням розроблених адаптивних моделей АРЧП проведено комплекс комп'ютерних розрахунків зі змінами в широких діапазонах основних показників генеруючих та регулюючих джерел енергосистеми (швидкодія, сталі часу, допустиме відхилення частоти). Проведено співставний аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: енергосистема, частота, потужність, генератор, регулятор, споживач, швидкодія, автоматичне регулювання.

У системах автоматичного регулювання частоти і потужності (АРЧП), що функціонують в енергосистемах практично усіх розвинутих країн та використовують для регулювання електричні генератори, реалізується один із класичних законів автоматичного регулювання, а саме, пропорційно-інтегральний (ПІ) закон. Згідно з ним організується пошук значення компенсуючої потужності, яке забезпечить в системі квазістаціонарну частоту [1, 2]. Характерно, що цей процес починається з нульового значення регулюючої потужності, тому пошук точки рівноваги потребує певного часу (до 15 хв.).

У сучасних умовах технічного розвитку в енергетиці з'явилась можливість побудови системи АРЧП (САРЧП) на принципово іншій технологічній основі, яку доцільно реалізувати,

© М.М. КУЛИК, І.В. ДРЬОМІН, 2015

перш за все, в енергосистемі України. Побудова такої САРЧП на відміну від традиційного підходу ґрунтується не на введенні додаткових регулюючих потужностей при виникненні в ОЕС їх дефіциту, а на зменшенні енергоспоживання спеціальною групою споживачів-регуляторів (СР). Найефективнішими з них є теплонасосні станції (ТНС), що працюють у складі систем централізованого теплопостачання (СЦТ). Такі генератори теплової енергії, використовуючи електричну енергію та енергію довілля, мають високу енергетичну ефективність. Окрім того, функціонування в структурі генераторів тепла СЦТ надає можливість їх використання в режимах короткострокового (15–30 хв.) припинення роботи без погіршення теплопостачання споживачів.

В Інституті загальної енергетики НАН України вперше була запропонована та досліджена модель [3, 4], в якій АРЧП здійснюється

такими споживачами-регуляторами. Використання СР в системах АРЧП має низку важливих переваг: значно підвищуються їх швидкодія та точність, що є винятково важливим для цих систем; ще в більшій мірі зростає їх економічна ефективність; значно зростає рівень енергетичної безпеки країни; має місце сукупність інших переваг [5, 6].

Подальше удосконалення систем АРЧП забезпечується шляхом розроблення більш ефективного математичного апарату з використанням принципу адаптації.

Особливістю моделювання системи АРЧП є те, що з її моделі можна виділити рівняння, яке дозволить ідентифікувати знак та обсяги небалансу активної потужності в ОЕС, який (небаланс) призводить до зміни частоти і потужності. Визначений небаланс потужності енергосистеми вводиться як адаптивна складова у закон регулювання.

Таким рівнянням є баланс потужності універсальної моделі системи АРЧП [4]:

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{i=1}^M J_{zi} + \sum_{j=1}^R J_{nj} \right) \omega(t) \frac{d\omega(t)}{dt} = \\ & = \sum_{i=1}^I P_{zi}(t) + \sum_{i=I+1}^M P_{spi}(t) - \sum_{j=1}^N P_{nj}(t) - \\ & - \sum_{j=N+1}^R P_{cpj}(t) - P_e(t) - \xi(t) \end{aligned} \quad (1)$$

з початковими умовами

$$\left. \begin{aligned} P_{zi}(0) &= P_{zi_0}, \quad i = \overline{1, I}, \\ P_{spi}(0) &= P_{spi_0}, \quad i = \overline{I+1, M}, \\ P_{nj}(0) &= P_{nj_0}, \quad j = \overline{1, N}, \\ P_{cpj}(0) &= P_{cpj_0}, \quad j = \overline{N+1, R}, \\ \omega(0) &= \omega_0, \\ t &= \overline{0, T} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

та позначеннями

$\omega = 2\pi f$, f – частота енергосистеми, $\omega_0 = \omega(t=0)$, T – інтервал дослідження,

J_{zi} – момент інерції i -го генератора (генератор та турбіна); $i = \overline{1, M}$; M – загальна кількість

генераторів в системі (нерегульовані та регульовані);

J_{nj} – момент інерції j -го навантаження (споживача); $j = \overline{1, R}$; R – загальна кількість навантажень в системі (нерегульовані та споживачі-регулятори);

$P_{zi}(t)$ – потужність i -го генератора в момент t ; $i = \overline{1, I}$; I – загальна кількість нерегульованих генераторів в системі;

$P_{nj}(t)$ – потужність j -го навантаження в момент t ; $j = \overline{1, N}$; N – загальна кількість нерегульованих навантажень в системі;

$P_{spi}(t)$ – потужність i -го генератора-регулятора в момент t ; $i = \overline{I+1, M}$;

$P_{cpj}(t)$ – потужність j -го споживача-регулятора в момент t ; $j = \overline{N+1, R}$;

$P_e(t)$ – потужність втрат у момент t в енергосистемі (генератори, мережа та навантаження);

$\xi(t)$ – стохастична складова усіх споживачів та втрат у момент t .

Дійсно, в рівнянні (1) похідна $d\omega(t) = dt$ в початковий момент часу $t = t_0 = 0$ дорівнює нулю, а тому і вся ліва частина цього рівняння дорівнює нулю. В момент появи збурення $t = t_0 + 0$ в системі виникає небаланс електричної потужності, права частина рівняння (1) є його числовим виразом. Однак обчислити небаланс потужності у вигляді правої частини рівняння (1) теоретично можна, але значно простіше і точніше це можна зробити шляхом обчислення його лівої частини, яка в кожний момент часу є тотожною правій і дорівнює небалансу потужності. Використання показника небалансу потужності, обчисленого в початковий момент перехідного періоду регулювання частоти, є адаптацією системи АРЧП до стану ОЕС в аварійній ситуації. Оскільки величина небалансу потужності стає відомою на початку аварійного періоду, цю величину можна відразу задавати як уставку на відповідні регулятори. Якби регулятори відпрацьовували цю уставку миттєво, тобто мали дуже високу швидкодію, процес регулювання в системі також відбувався б дуже швидко, і період регулювання прямував би до нуля. Однак через те, що регулятори мають обмеження на швидкість зміни своєї потужності, миттєвого регулювання не відбувається. Незважаючи на це, якщо в системі АРЧП використовуються швидкодіючі регулятори, застосування в ній принципу адаптації призводить до суттєвого підвищення її

загальної швидкодії, яка є основним показником, що забезпечує технічну ефективність системи.

Адаптивний закон регулювання згідно з цим принципом формується у вигляді суми ПІ-закону та адаптивної складової для генераторів-регуляторів (уставка i -го генератора-регулятора):

$$F_{cpi} = \alpha D_{acpi} + A_{cpi} (\omega_0 - \omega(t)) + S_{cpi} \int_0^t (\omega_0 - \omega(\theta)) d\theta, \quad (3)$$

$$i = \overline{I+1, M}, \quad \sum_{i=I+1}^M D_{acpi} = D_a, \quad (4)$$

$$D_a = -T_c \sum_{i=1}^I P_{zi0} \frac{\omega(t_1)}{\omega_0^2} \frac{d\omega(t)}{dt} \Big|_{t=t_1}, \quad (5)$$

та для споживачів-регуляторів (уставка j -го споживача-регулятора):

$$F_{cpj} = \alpha D_{acpj} + A_{cpj} (\omega(t) - \omega_0) + S_{cpj} \int_0^t (\omega(\theta) - \omega_0) d\theta, \quad (6)$$

$$j = \overline{N+1, R}, \quad \sum_{j=N+1}^R D_{acpj} = D_a, \quad (7)$$

$$D_a = T_c \sum_{i=1}^I P_{zi0} \frac{\omega(t_1)}{\omega_0^2} \frac{d\omega(t)}{dt} \Big|_{t=t_1}, \quad (8)$$

де D_a – адаптивна складова, $\alpha = [0;1]$ – індикатор адаптивної складової, t_1 – перший момент часу після початку аварії, в який були зроблені заміри частоти та її похідної. У виразах (5), (8) використана залежність [4]:

$$\sum_{i=1}^M J_{zi} + \sum_{j=1}^R J_{nj} = \frac{T_c \sum_{i=1}^M P_{zi0}}{\omega_H^2}, \quad (9)$$

де T_c – стала механічної інерції (стала часу) енергосистеми, $[T_c] = \text{сек}$, P_{zi0} , ω_H – номінальні значення потужності i -го генератора та кругової частоти.

Заміна регулюючих функцій F_{cpi} та F_{cpj} в універсальній моделі [4] на залежності (3), (6) дозволяє розширити її функціональні можливості і досліджувати як адаптивні, так і неадаптивні САРЧП.

З використанням адаптивних моделей були проведені дослідження процесів АРЧП в системах, в яких у ролі регуляторів фігурували генератори-регулятори, що реалізовували регулюючі функції (3) – (5) при $\alpha = 1$.

Було проведено широке коло цифрового моделювання функціонування об'єднаних енергосистем, в яких діяли як адаптивні, так і неадаптивні САРЧП з газомазутними, пилувільними та гідравлічними генераторами-регуляторами. При цьому встановлено, що використання адаптивних САРЧП з такими генераторами-регуляторами не покращує їх основних характеристик (швидкодія та максимальне відхилення частоти). Зумовлено таке явище недостатньою швидкістю зазначених генераторів-регуляторів.

Однак потрібно враховувати, що в деяких енергосистемах (зокрема, в США) в структурі їх генеруючих потужностей все інтенсивніше використовуються генератори з накопиченням електроенергії (вітрові та сонячні електростанції з акумуляцією та перетворенням), які забезпечують дуже великі швидкості зміни потужності, що надає можливість їх ефективного застосування в адаптивних САРЧП.

З використанням узагальненої моделі був проведений комплекс розрахунків перехідних процесів в САРЧП, побудованих із залученням споживачів-регуляторів. Досліджувались режими енергосистем зі значними збуреннями, в яких варіювалися швидкодія, допустиме відхилення частоти $|\Delta f|_d$ та стала часу регуляторів.

Моделювання процесів регулювання частоти і потужності в енергосистемі провадилось на багатоагрегатній схемі ОЕС, еквівалент якої наданий на рис. 1. Сумарна потужність всіх еквівалентних генераторів в початковий момент часу становила $27 \cdot 10^3$ МВт, потужність навантаження – $24 \cdot 10^3$ МВт, втрати визначені сталими $P_g(t) = 3 \cdot 10^3$ МВт на весь період $[0, T]$, в момент $t = 0$ відмикався генератор P_{z6} потуж-

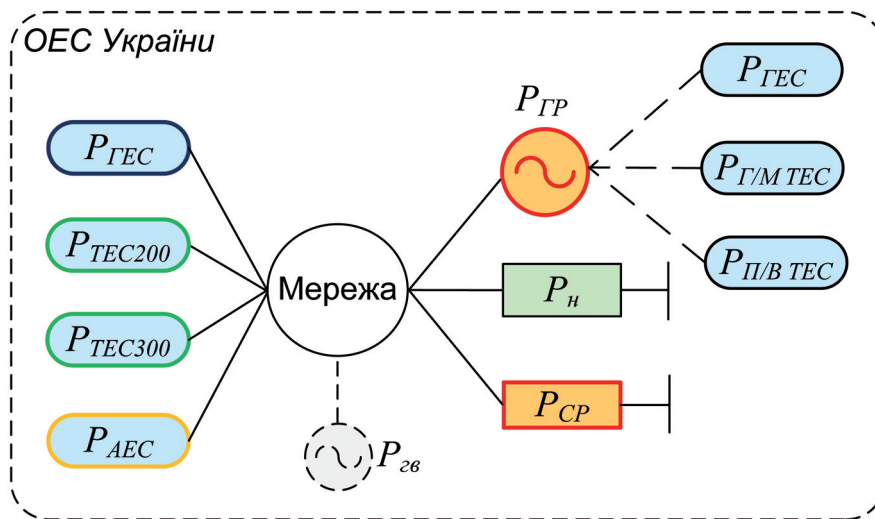


Рис. 1. Еквівалентна схема ОЕС

ністю 1000 МВт, а частота вважалась номінальною $f_0 = 50$ Гц. Всі інші параметри моделі змінювались у відповідності з умовами експерименту.

Метою цифрового моделювання було визначення основних функціональних показників САРЧП, а саме, протяжності перехідного процесу та модуля максимального відхилення частоти при зміні основних параметрів регулятора в досить широких межах. При виконанні моделювання змінювались такі параметри: швидкість зростання/зменшення потужності регулятора – (10, 20, 40, 80) % $P_{\text{ном}}/\text{сек}$; стала часу регулятора – (0,2; 0,5; 1,0) сек; допустиме відхилення частоти $|\Delta f|_{\delta} = (0,02; 0,2)$ Гц.

Визначення ефективності адаптивних САРЧП провадилось шляхом співставного аналізу їх основних показників з неадаптивними САРЧП, які мають аналогічні параметри. Тобто, порівнялись між собою системи, в яких співпадають всі параметри, окрім індикатора адаптивної складової α в залежності (6), який для адаптивних САРЧП дорівнює 1, а для неадаптивних – 0.

На рис. 2 для прикладу наведені діаграми зміни в часі відхилення частоти та потужності споживача-регулятора для САРЧП, що діє по ПІ-закону без адаптації, а на рис. 3 – аналогічні діаграми для такої самої САРЧП, але в якій використовується адаптивна складова. Всі інші умови та параметри моделі наведені у таблицях на цих рисунках і співпадають між собою.

Згідно з рис. 2 (САРЧП без адаптації) перехідний процес зміни частоти при зоні $|\Delta f|_{\delta} = 0,02$ Гц, сталій часу регулятора $\tau_p = 0,5$ сек та швидкодії $L_p = 40\% P_{\text{ном}}/\text{сек}$ закінчується через 34,4 сек після збурення, а максимальне відхилення частоти становить при цьому 0,22 Гц.

У системі з адаптацією (рис. 3) відповідні показники становлять $T_n = 16,1$ сек та 0,17 Гц. Тобто, в системі з адаптацією перехідний процес скорочується у 2,14 раза, а відхилення частоти – на 30%.

При $|\Delta f|_{\delta} = 0,2$ Гц в САРЧП без адаптації протяжність перехідного процесу $T_n = 5,4$ сек, тоді як у САРЧП з адаптацією $|\Delta f|_{\delta} \leq 0,17$ Гц, тобто, режим залишається квазістаціонарним ($|\Delta f|_{\delta} = 0,2$ Гц) і перехідний процес відсутній ($T_n = 0$) при дуже сильному збуренні (вимикався енергоблок АЕС потужністю 1000 МВт).

Аналогічні дослідження були проведені для всього поля зміни параметрів L_p , τ_p , $|\Delta f|_{\delta}$, наведених вище. Загалом було розраховано 24 перехідні процеси, в тому числі, 12 процесів в системах АРЧП без адаптації та 12 – у відповідних системах з адаптацією.

Результати наведених досліджень відображені в таблиці та на рис. 4, 5. Отримані результати надають можливість зробити такі узагальнення.

1. Використання адаптивних моделей значно зменшує протяжність перехідних процесів в ОЕС при дії САРЧП. Зокрема,

Имя элемента ЭС	Мощность номинальная, МВт	Крутизна на част. хар-ки, МВт/1/с	Пост. времени, сек	A	S	Нач. условия/ переменная	Скорость сброса/ набора мощности, %/сек	Зона нечувствит., Гц	Величина адаптивной составляющей, МВт
ГЭС	3000	0,37	5	0	0	3000	0	0	0
ТЭС200	3180	0,39	5	0	0	3180	0	0	0
ТЭС300	6000	0,73	5	0	0	6000	0	0	0
АЭС	13820	1,81	5	0	0	13820	0	0	0
Нагрузка	24000	153	0,5	0	0	24000	0	0	0
ПР	1000	6	0,5	500	45	0	40	0,02	0

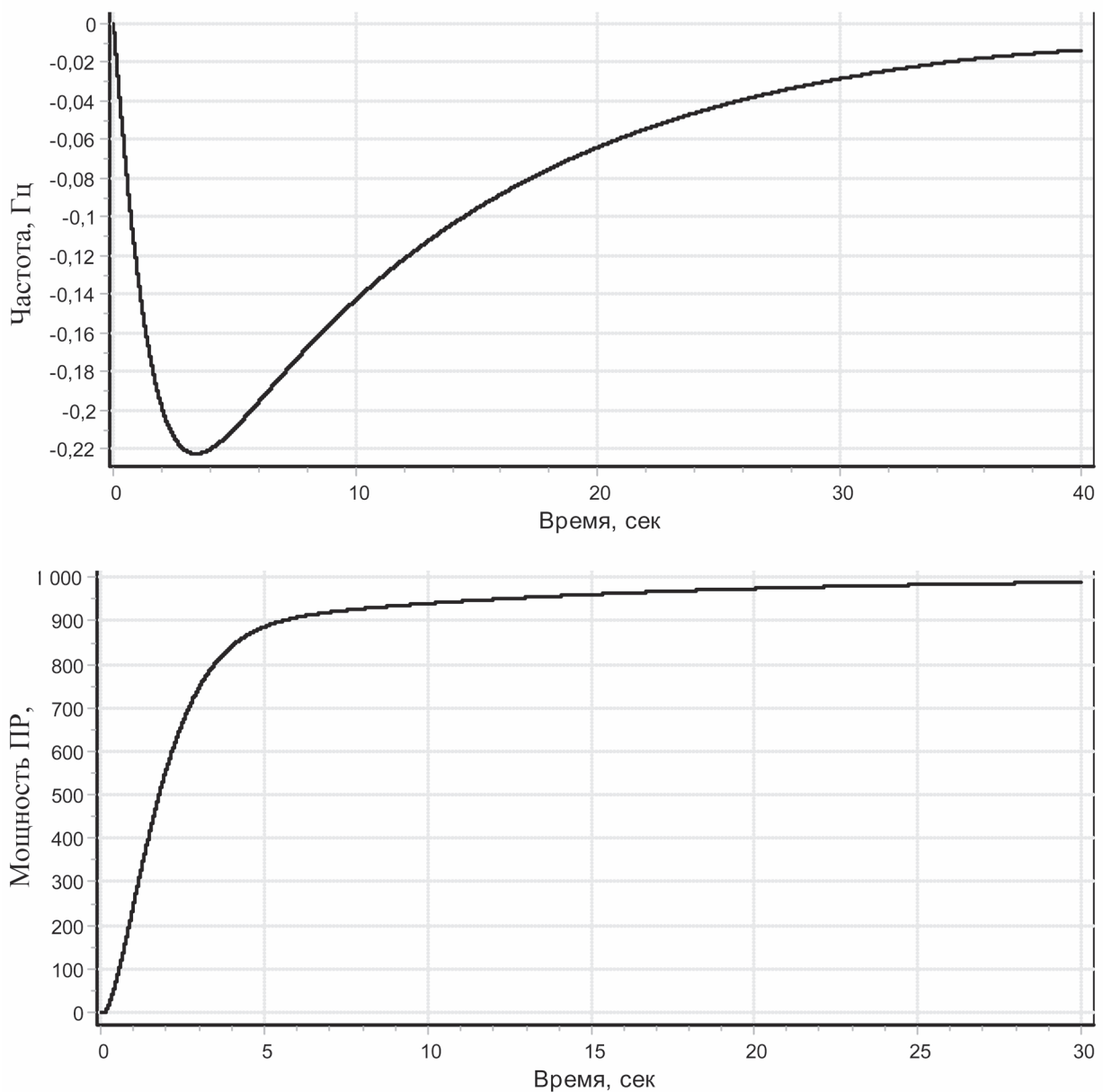


Рис. 2. Відхилення частоти і потужність споживача-регулятора

Имя элемента ЭС	Мощность номинальная, МВт	Крутизна на част. хар-ки, МВт/1/с	Пост. времени, сек	A	S	Нач. условия/ переменная	Скорость сброса/ набора мощности, %/сек	Зона нечувствит., Гц	Величина адаптивной составляющей, МВт
ГЭС	3000	0,37	5	0	0	3000	0	0	0
ТЭС200	3180	0,39	5	0	0	3180	0	0	0
ТЭС300	6000	0,73	5	0	0	6000	0	0	0
АЭС	13820	1,81	5	0	0	13820	0	0	0
Нагрузка	24000	153	0,5	0	0	24000	0	0	0
ПР	1000	6	0,5	500	45	0	40	0,02	990,53

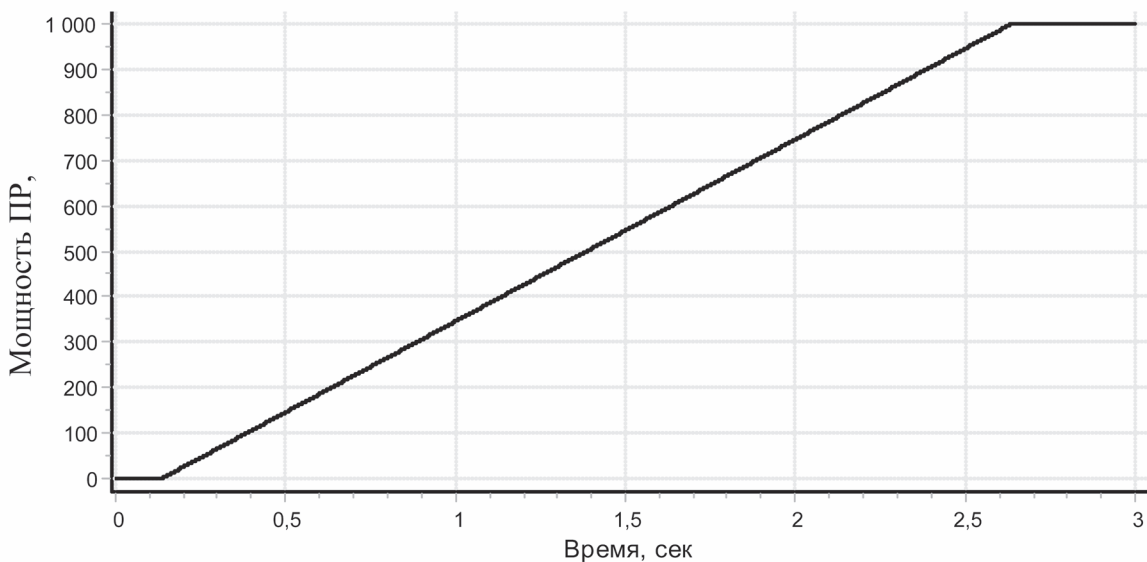
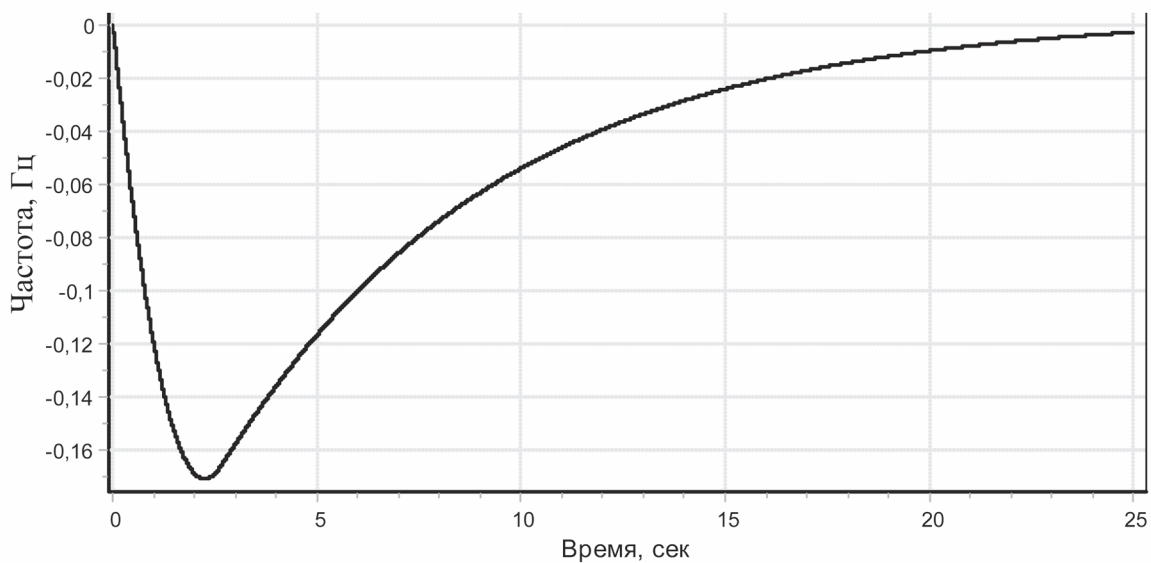


Рис. 3. Відхилення частоти і потужність споживача-регулятора в САРЧП, що діє по ПІ-закону з адаптацією

Таблиця – Прогляжність перехідного процесу (T_n , сек), максимальне відхилення частоти ($|\Delta f(t)|_{max}$, Гц), індикатор адаптивної складової (α)

Допустиме відхилення частоти, $ \Delta f _{д.}$, Гц	0,02																
	0,2				0,2				0,5				1				
	0,2		0,5		0,2		0,5		1		0,2		0,5		1		
Стага часу регулятора, τ_p , сек	T_n		$ \Delta f _{max}$		T_n		$ \Delta f _{max}$		T_n		$ \Delta f _{max}$		T_n		$ \Delta f _{max}$		
α	T_n		$ \Delta f _{max}$		T_n		$ \Delta f _{max}$		T_n		$ \Delta f _{max}$		T_n		$ \Delta f _{max}$		
10	0	12,7	0,40	13,9	0,41	14,3	0,42	25,8	0,4	27,7	0,41	28,6	0,42	31,9	0,29	33,7	0,25
	1	9,9	0,32	12,8	0,41	13,1	0,42	22,0	0,32	25,6	0,41	27,2	0,42	31,9	0,29	33,7	0,25
	0	6,7	0,28	6,8	0,28	7,20	0,29	32,9	0,28	32,7	0,28	31,9	0,29	31,9	0,29	33,7	0,25
	1	6,2	0,27	6,6	0,27	6,7	0,28	18,1	0,27	20,5	0,27	21,6	0,28	21,6	0,28	33,7	0,25
20	0	5,4	0,21	5,7	0,22	6,10	0,25	34,8	0,21	34,4	0,22	33,7	0,25	31,9	0,29	33,7	0,25
	1	0	0,17	0	0,17	0	0,17	14,6	0,17	16,1	0,17	16,8	0,17	16,8	0,17	16,8	0,17
	0	5,43	0,21	5,7	0,22	6,12	0,25	34,8	0,21	34,4	0,22	33,7	0,25	31,9	0,29	33,7	0,25
	1	0	0,10	0	0,10	0	0,11	11,2	0,10	12,1	0,11	12,8	0,11	12,8	0,11	12,8	0,11
40	0	5,4	0,21	5,7	0,22	6,10	0,25	34,8	0,21	34,4	0,22	33,7	0,25	31,9	0,29	33,7	0,25
	1	0	0,17	0	0,17	0	0,17	14,6	0,17	16,1	0,17	16,8	0,17	16,8	0,17	16,8	0,17
	0	5,43	0,21	5,7	0,22	6,12	0,25	34,8	0,21	34,4	0,22	33,7	0,25	31,9	0,29	33,7	0,25
	1	0	0,10	0	0,10	0	0,11	11,2	0,10	12,1	0,11	12,8	0,11	12,8	0,11	12,8	0,11
80	0	5,4	0,21	5,7	0,22	6,10	0,25	34,8	0,21	34,4	0,22	33,7	0,25	31,9	0,29	33,7	0,25
	1	0	0,17	0	0,17	0	0,17	14,6	0,17	16,1	0,17	16,8	0,17	16,8	0,17	16,8	0,17
	0	5,43	0,21	5,7	0,22	6,12	0,25	34,8	0,21	34,4	0,22	33,7	0,25	31,9	0,29	33,7	0,25
	1	0	0,10	0	0,10	0	0,11	11,2	0,10	12,1	0,11	12,8	0,11	12,8	0,11	12,8	0,11

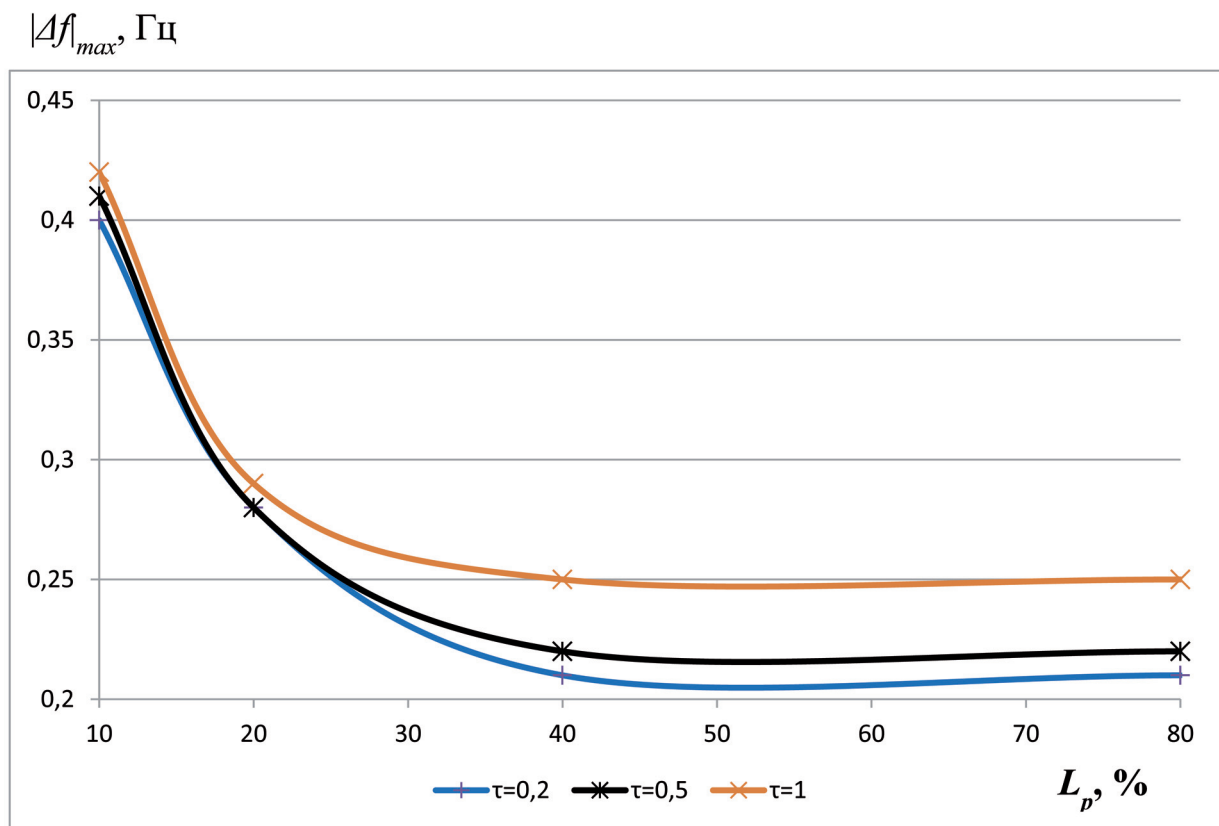
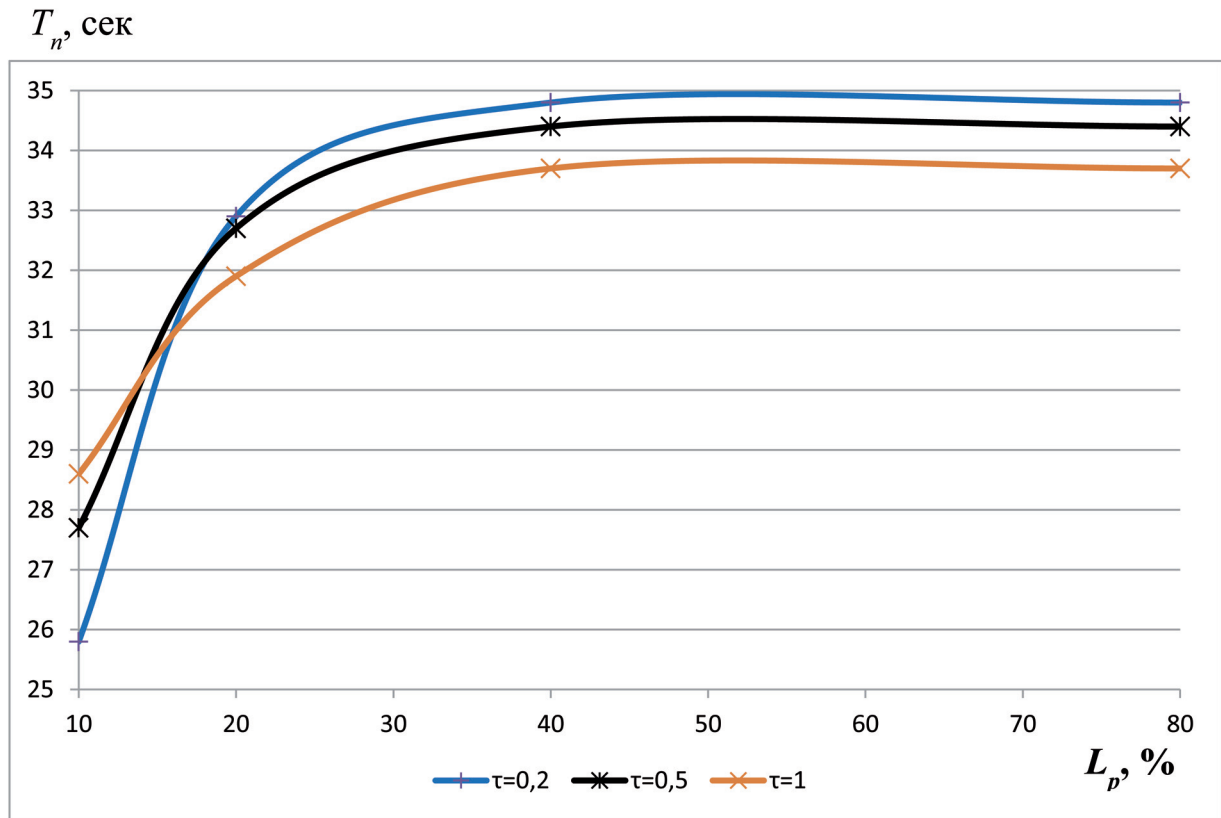


Рис. 4. Протяжність перехідного процесу (T_n , сек) та максимальне відхилення частоти ($|\Delta f(t)|_{max}$, Гц), в залежності від швидкості зростання/зменшення регулюючої потужності ($L_p, \% P_{ном}/\text{сек}$) в системах без адаптації ($\Delta f_{\delta}=0,02$ Гц)

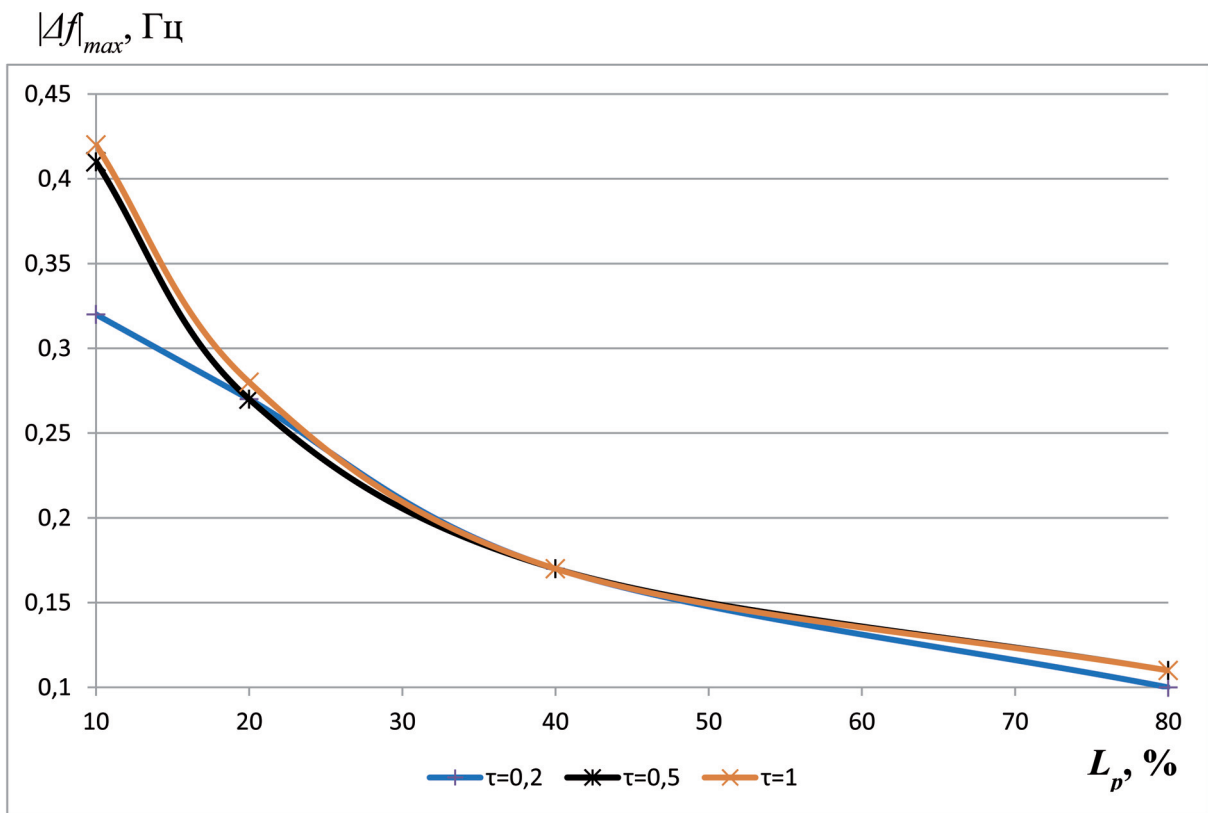
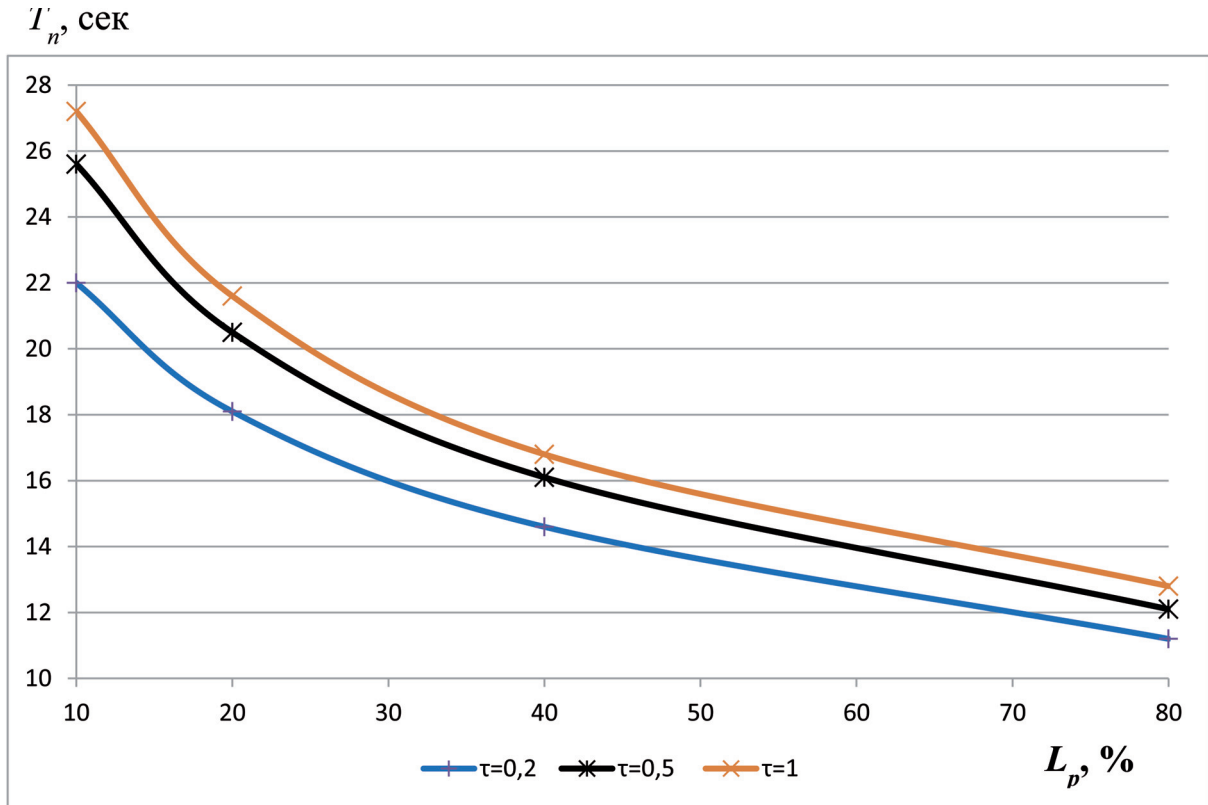


Рис. 5. Протяжність переходного процесу (T_n , сек) та максимальне відхилення частоти ($|\Delta f(t)|_{max}$, Гц), в залежності від швидкості зростання/зменшення регулюючої потужності (L_p , % $P_{рном}$ /сек) в системах з адаптацією ($|\Delta f|_{\delta}=0,02$ Гц)

при відмиканні потужності 1000 МВт, допустимому відхиленні частоти $|\Delta f|_{\delta} = 0,02$ Гц, швидкодії регулятора $L_p = 40\% P_{\text{регном}}/\text{сек}$ та його сталій часу $\tau_p = 0,5$ сек протяжність процесу регулювання в САРЧП з адаптацією становить 16,1 сек і скорочується у 2,2 раза у порівнянні із системою без адаптації та у 4,4 раза – у порівнянні із САРЧП, побудованої з використанням ГЕС.

2. У системах АРЧП з адаптацією помітно (більш, ніж на 30%) зменшується модуль максимального відхилення частоти в порівнянні із системою без адаптації при рівності інших умов.

3. Модуль максимального відхилення частоти при $|\Delta f|_{\delta} = 0,2$ Гц із зростанням швидкодії регулятора для обох систем зменшується. Однак для систем з адаптацією це явище проявляється більш радикально. Результатом цього є те, що згідно з таблицею та рис. 5 для них при швидкодії регулятора більшій, ніж $30\% P_{\text{регном}}/\text{сек}$ виконується нерівність $|\Delta f(t)|_{\text{max}} < 0,2$ Гц, тобто, навіть при дуже великих збуреннях (відмикання потужності 1000 МВт) забезпечується квазістаціонарний (за поточними вимогами ОЕС України) режим. Для систем без адаптації такий важливий результат не досягається навіть при швидкодії $80\% P_{\text{регном}}/\text{сек}$.

4. Згідно з даними таблиці протяжність перехідних процесів T_n при $|\Delta f|_{\delta} = 0,02$ Гц і зростанні швидкодії регулятора в системах з адаптацією зменшується, а в системах без адаптації – збільшується. Разом з тим згідно з [4] при зростанні швидкодії регулятора в діапазоні малих значень $L_{\text{рег}}$ протяжність перехідних процесів T_n в системах САРЧП без адаптації зменшується. Зокрема, при використанні в ролі генераторів-регуляторів пилувугільних, нових газомазутних та гідравлічних енергоблоків зі швидкодією (2,5; 8,0; 120,0)% $P_{\text{регном}}/\text{хв}$. протяжність перехідних процесів становить 36 хв., 12 хв. та 70 сек відповідно [4]. Тобто, в широкому діапазоні зміни $L_{\text{рег}}$ має місце мінімальне значення $T_n(L_{\text{рег}})$. Така ситуація зумовлена, зокрема, тим, що в законі регулювання при зменшенні $|\omega(t) - \omega_0|$ пропорційна складова зменшується, а інтегральна – збільшується. При цьому різниця в швидкості таких змін є різною в точках $|\Delta f(t)|_{\text{max}} = 0,2$ Гц та $|\Delta f(t)|_{\text{max}} =$

$= 0,02$ Гц. Більш детальне та точне розкриття цього явища, зокрема, знаходження точки екстремуму, потребує окремого дослідження.

5. Застосування адаптивних моделей систем АРЧП забезпечує багатократне підвищення їх швидкодії без жодних додаткових технологічних витрат, а лише за рахунок удосконалення законів регулювання. Ця особливість значно підвищує не тільки технологічну, а й економічну ефективність адаптивних САРЧП, оскільки згідно з [6] для підвищення, наприклад, вдвічі швидкодії САРЧП, побудованої на енергоблоках пилувугільної ТЕС, потрібно вдвічі збільшити кількість таких енергоблоків.

1. *UCTE Operation Handbook Policy 1: Load-Frequency Control and Performance (Final policy 2.2 E, 20.07.2004).*

2. *Основні вимоги щодо регулювання частоти та потужності в ОЕС України. СОУ НEE ЯЕК 04156:2009. Наказ Міністерства палива та енергетики від 26.03.2009 р. № 158.*

3. *Кулик М.М., Дрьомін І.В.* Основи організації автоматичної системи регулювання частоти і потужності на базі споживачів-регуляторів // Проблеми загальної енергетики. – 2010. – № 21. – С. 5–10.

4. *Кулик М.М., Дрьомін І.В.* Універсальна модель регулювання частоти і потужності в об'єднаних енергосистемах // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – № 35. – С. 5–15.

5. *Кулик М.М.* Співставний аналіз техніко-економічних характеристик Канівської ГАЕС та комплексу споживачів-регуляторів для покриття графіків електричних навантажень // Проблеми загальної енергетики. – 2014. – № 39. – С. 5–10.

6. *Кулик М.М.* Техніко-економічні аспекти використання споживачів-регуляторів у системах автоматичного регулювання частоти і потужності // Проблеми загальної енергетики. – 2015. – № 40. – С. 20–28.

Надійшла до редколегії 16.11.2015