

## СПОСІБ ОПТИМАЛЬНОГО ВТОРИННОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА ПОТУЖНОСТІ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;  
<sup>2</sup>ДП «НЕК «Укренерго», Київ

*Викладено умови, за яких техніко-економічні показники процесів вторинного регулювання частоти й потужності в електроенергосистемі (ЕЕС) можуть бути близькими до оптимальних. Показано, що для виконання таких умов достатньо підтримувати коефіцієнт підсилення системи вторинного автоматичного регулювання частоти й потужності за відхиленням частоти на рівні числового значення дійсного коефіцієнта жорсткості ЕЕС за частотою.*

**Ключові слова:** електроенергосистема, механічна потужність генерування, активна електрична потужність споживання, первинні частотні характеристики, первинне і вторинне регулювання частоти і потужності.

### Вступ

Відповідно до вимог ENTSO-E [1] засоби первинного регулювання частоти усіх електроенергетичних систем (ЕЕС), які об'єднано з метою спільного (синхронного) функціонування, мають брати негайну участь у ліквідації аварійного небалансу механічної і активної електричної потужностей незалежно від того, де утворився небаланс. У подальшому баланс потужності в енергосистемі (сумарної механічної та електричної споживаної) на встановленому номінальному рівні частоти відновлюється через задіяння засобів вторинного автоматичного регулювання частоти і потужності (АРЧП) лише тією ЕЕС, в котрій утворився такий небаланс. Ймовірні значення розрахункового небалансу можна визначити на основі статичних частотних характеристик ЕЕС, які змінюються з плином часу [2]. Однак, налаштування контурів системи вторинного АРЧП за відхиленням частоти виконують з використанням незмінних значень коефіцієнтів підсилення [1], що обмежує якісні та економічні показники енергосистеми.

Отже, задача розрахунку вторинних СЧХ об'єднаної енергосистеми з наперед заданими властивостями і використання таких розрахункових даних для здійснення автоматичного регулювання частоти і перетікань активної потужності АРЧП в процесі вторинного регулювання частоти регіональними ЕЕС постає за нових, жорсткіших умов щодо якості процесів керування.

### Основна частина

Відомо, що стаціонарний режим електроенергетичної системи (ЕЕС) за частотою й потужністю визначається точкою перетину усереднених первинних статичних частотних характеристик (СЧХ) сумарних механічної потужності генерування  $P_{\Sigma T}(f)$  і активної електричної потужності споживачів електричної енергії  $P_{\Sigma H}(f)$  [3—5]. Основним параметром первинних СЧХ є коефіцієнт крутизни  $k$  і його знак, що характеризує величину кута нахилу СЧХ до осі частоти, які визначаються значенням першої похідної по частоті від функції  $P_{\Sigma}(f)$  в точці, яка відповідає досліджуваному режиму енергосистеми за частотою і потужністю  $k_T = dP_{\Sigma T}(f)/df$ ;  $k_H = dP_{\Sigma H}(f)/df$ .

Наближено у відносних одиницях коефіцієнти крутизни можна визначити через номінальне значення частоти  $f_n$  і базове значення потужності  $P_0$  [6]  $k = \Delta P_{\Sigma}(f) f_n / (\Delta f P_0)$ . Значення коефіцієнтів крутизни первинних СЧХ входять до критеріїв стійкості ustalених режимів енергосистеми [7, 5], й, відповідно, характеризують аперіодичну стійкість енергосистеми: точки дотику первинних СЧХ визначають границю аперіодичної стійкості. Змінюючи склад генерувального обладнання і керуючи механічною потужністю в енергосистемі існує принципова можливість формувати нові (вторинні) СЧХ із бажаними параметрами.

Покажемо, що інформація про поточні значення параметрів  $k_T$  і  $k_H$  первинних СЧХ  $P_{\Sigma T}(f)$  і  $P_{\Sigma H}(f)$  та її використання для організації ефективного автоматичного регулювання частоти й потужності (АРЧП) ЕЕС відіграє ключову роль, адже ці поточні значення параметрів  $k_H$  і  $k_T$  визначають економічні показники процесів виробництва, перетворення й передавання електричної енергії у процесах вторинного АРЧП.

Порушення балансу між механічною та активною електричною потужностями в енергосистемі призводить до відхилень частоти і потужності вихідного збалансованого режиму. Для окремої енергосистеми, що працює ізольовано, та для енергооб'єднання двох енергосистем у роботі [8] отримано співвідношення для визначення відхилень частоти й потужності в стаціонарних режимах після завершення дії збурень — через відомі значення коефіцієнтів крутизни первинних СЧХ і небалансу потужності енергосистеми.

Зокрема, для ізольованої енергосистеми, відхилення частоти  $\Delta f$  й потужності  $\Delta P_{\Sigma}$  в стаціонарних режимах після збурень визначають за лінеаризованими первинними СЧХ

$$\Delta f = -P_{\text{нб}} / (k_H - k_T) = [\pm P_T - (\pm P_H)] / (k_H - k_T); \quad \Delta P_{\Sigma} = [k_H (\pm P_T) - k_T (\pm P_H)] / (k_H - k_T),$$

причому  $P_{\text{нб}}$  — небаланс потужності в ЕЕС, МВт;  $k_H$  і  $k_T$  — коефіцієнти крутизни первинних СЧХ  $P_{\Sigma H}(f)$  і  $P_{\Sigma T}(f)$ , МВт/Гц;  $\pm P_H$  і  $\pm P_T$  — частки небалансу  $P_{\text{нб}}$ , зумовлені зміною активної електричної потужності споживання й механічної потужності генерування, відповідно, МВт (знак «плюс»/«мінус» означають збільшення/зменшення споживання і генерування в ЕЕС).

Отже, з появою небалансу, ізольована енергосистема завдяки дії первинних СЧХ (первинного «саморегулювання» частоти і потужності) набуває нових усталених значень частоти і потужності, які відрізняються від початкових параметрів режиму. Ці усталені значення відхилень частоти і потужності після завершення дії збурень визначаються параметрами первинних СЧХ  $P_{\Sigma T}(f)$  і  $P_{\Sigma H}(f)$  й значенням виявленого небалансу потужності.

Таким чином, завданням вторинного АРЧП в ізольованій енергосистемі є таке управління активною потужністю енергоблоків-регуляторів, за якого відхилення частоти, зумовлене небалансом потужності й зрівноважене дією первинного саморегулювання, буде ліквідовано із заданою точністю. Наприклад, відхилення частоти від номінальної у стаціонарному режимі після збурення й післядії системи вторинного АРЧП буде нульовим лише за умови дотримання рівності приросту механічної потужності  $\Delta P_{\text{вр}}$  ( $P_{\text{вр}}$  — потужність вторинного регулювання) значенню небалансу потужності з протилежним знаком:  $\Delta P_{\text{вр}} = -P_{\text{нб}}$ . З (1) маємо  $P_{\text{нб}} = -(k_H - k_T)\Delta f$ , звідки потужність вторинного регулювання

$$\Delta P_{\text{вр}} = (k_H - k_T)\Delta f; \quad \Delta f = f - f_0 = 0, \quad (2)$$

де  $f$  — поточне значення частоти ЕЕС у процесі регулювання, Гц;  $f_0$  — планове значення частоти ЕЕС, або уставки частоти, Гц. Користуючись виразом (2), легко отримати вторинну СЧХ ЕЕС в околі точки  $f_0$  — планового значення частоти ЕЕС експериментально. В координатах «активна потужність ЕЕС — частота» таку СЧХ можемо зобразити прямою лінією, паралельною осі потужності ЕЕС, їй відповідатиме астатичне регулювання частоти, за якого  $f = \text{const}$ , або  $\Delta f = 0$ .

Алгебраїчна різниця коефіцієнтів крутизни  $(k_H - k_T)$  первинних СЧХ  $P_{\Sigma H}(f)$  і  $P_{\Sigma T}(f)$  є характеристикою жорсткості режимів ЕЕС по частоті, відповідно у [7] запропоновано іменувати цей показник коефіцієнтом жорсткості ЕЕС по частоті  $k_{\text{ж}f}$ . З урахуванням цього закон вторинного регулювання (2) матиме вигляд

$$\Delta P_{\text{вр}} = k_{\text{ж}f} (f - f_0); \quad f - f_0 = 0. \quad (3)$$

У рівнянні підсилювача (3) коефіцієнт жорсткості ЕЕС по частоті  $k_{\text{ж}f}$  є коефіцієнтом підсилення за відхиленням частоти  $\Delta f$ .

Якщо коефіцієнт підсилення за відхиленням частоти у вторинному регуляторі частоти й потужності відрізняється від значення коефіцієнта  $k_{\text{ж}f}$ , то вироблена засобами вторинного АРЧП потужність вторинного регулювання компенсуватиме небаланс потужності лише з обмеженою точністю, внаслідок чого регулювання частоти електроенергетичної системи буде відбуватися з недокомпенсацією або перекомпенсацією відхилення частоти.

Іншими словами, вторинне регулювання не буде оптимальним за критерієм точності регулювання частоти, якщо коефіцієнт підсилення САРЧП за відхиленням частоти чисельно не збігається з коефіцієнтом жорсткості енергосистеми.

Неякісне (неточне) регулювання частоти може викликати коливання режимних параметрів ЕЕС і призводить до надлишкового зносу блоків, які беруть участь в регулюванні, відтак погіршує економічні показники енергосистеми. Але відхилення значення коефіцієнта підсилення за частотою САРЧП від значення реального коефіцієнта жорсткості енергосистеми  $k_{жф}$  можна використати для отримання вторинних СЧХ ЕЕС з наперед заданими властивостями [2].

Дійсно, якщо значення коефіцієнта підсилення за частотою вторинного регулятора буде відрізнятися від реального коефіцієнта жорсткості енергосистеми за частотою на  $\Delta k$ :  $k'_{жф} = k_{жф} + \Delta k$ , то вироблена потужність вторинного регулювання  $\Delta P'_{вр}$  буде відрізнятися від необхідної  $\Delta P_{вр}$  на величину  $\Delta k \Delta f$

$$\Delta P'_{вр} = (k_{жф} + \Delta k) \Delta f = k_{жф} \Delta f + \Delta k \Delta f = \Delta P_{вр} + \Delta k \Delta f. \quad (4)$$

Для додатного значення параметра  $\Delta k$  вироблена дією САРЧП потужність вторинного регулювання (4) буде перевищувати значення виявленого небалансу потужності, що призведе до перекомпенсації відхилення частоти (регулювання частоти з від'ємним статизмом). За від'ємного значення параметра  $\Delta k$  вироблена дією САРЧП потужність вторинного регулювання (4) буде меншою від значення виявленого небалансу потужності — здійснюватиметься статичне регулювання частоти з додатним статизмом. У випадку *вторинного* АРЧП зі *статизмом* поточне значення частоти не буде постійним:

$$f = f_0 + \Delta f = f_0 + \delta P_{вр} / \Delta k; \quad \delta P_{вр} = \Delta k \Delta f = \Delta P'_{вр} - \Delta P_{вр}.$$

Відтак вторинне регулювання частоти за дотримання заданого додатного статизму може бути використано як один із способів зменшення амплітуди регулярних коливань міжсистемного перетікання потужності в режимах спільного функціонування різних ЕЕС.

Слід зазначити, що для усунення похибок регулювання частоти САРЧП, доводиться формувати додаткові керувальні впливи на електростанції, які беруть участь в регулюванні. Це об'єктивно буде знижувати економічність функціонування енергоблоків, задіяних в процесах АРЧП. З метою забезпечення оптимального за техніко-економічними показниками вторинного регулювання частоти в ізольованій енергосистемі коефіцієнт підсилення за частотою САРЧП має бути налаштованим на рівні дійсного поточного коефіцієнта жорсткості енергосистеми за частотою, що визначається різницею  $k_n - k_t$  коефіцієнтів крутизни первинних СЧХ  $P_{\Sigma n}(f)$  і  $P_{\Sigma t}(f)$  ЕЕС.

Розглянемо об'єднання двох ЕЕС, які функціонують спільно (паралельно), та проаналізуємо умови вторинного автоматичного регулювання частоти і сальдо перетікань активної потужності, що передбачені політикою об'єднаної енергосистеми ENTSO-E [1].

На рисунку зображено лінеаризовані в околі режимної точки первинні СЧХ енергосистем ЕЕС1 і ЕЕС2, що працюють паралельно. Сумарні механічні  $P_{т1}(f)$  і  $P_{т2}(f)$  і активні електричні  $P_{н1}(f)$  і  $P_{н2}(f)$  потужності кожної з енергосистем збалансовані ( $P_{н10} = P_{т10} = P_{10}$ ;  $P_{н20} = P_{т20} = P_{20}$ ) на частоті  $f_0$ . Тому сальдо міжсистемних перетікань активної потужності  $P_{\Sigma mc}$  є нульовим. Обидві енергосистеми оснащені САРЧП. Припустимо, що в енергосистемі ЕЕС1 раптово відключився генерувальний об'єкт потужністю  $P_{нб1}$ . Цей небаланс впливає на все об'єднання енергосистем (ОЕС) і після перехідного процесу частота відповідно до форми первинних СЧХ  $P_n(f)$  і  $P'_t(f)$  ОЕС встановиться на рівні  $f'_0$  з відхиленням від вихідної на величину  $\Delta f$ .

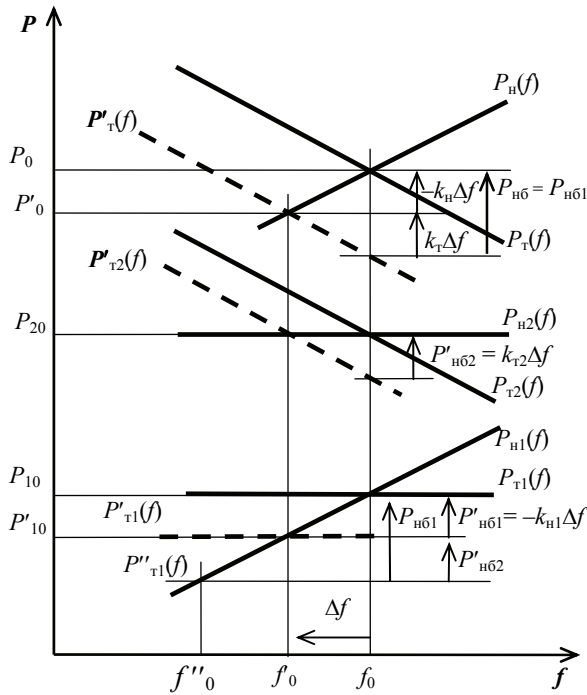
Новий рівень частоти  $f'_0$  і первинні СЧХ  $P_{н1}(f)$ ,  $P'_{т1}(f)$  енергосистеми ЕЕС1 і  $P_{н2}(f)$ ,  $P'_{т2}(f)$  енергосистеми ЕЕС2 визначають відповідно такі рівні споживання в енергосистемах:  $P'_{10}$  і  $P_{20}$ . Помічаємо, що небаланс потужності  $P_{нб1}$ , який початково виник в ЕЕС1, дорівнює небалансу  $P_{нб}$  для ОЕС і складається з частин  $P_{нб} = P_{нб1} = P'_{нб1} + P'_{нб2}$ . Натомість, у ЕЕС2 збурення не спостерігалися, відтак її первинні СЧХ залишилися початковими.

Втім, через відхилення частоти  $\Delta f$  в ОЕС первинне саморегулювання в ЕЕС2 виробило потужність  $P'_{нб2} = -k_{жт2} \Delta f = -(k_{н2} - k_{т2}) \Delta f = -k_{т2} \Delta f$ , оскільки коефіцієнт крутизни  $k_{н2} = 0$  (характеристика  $P_{н2}(f)$  на рисунку є паралельною осі частоти). Цю потужність витрачено на експорт до ЕЕС1, тобто, міжсистемне перетікання з ЕЕС2 до ЕЕС1 збільшилось:  $\pm \Delta P_{\Sigma mc} = P'_{нб2}$  (знак «плюс» позначає імпорт енергії енергосистемою ЕЕС1, відповідно, «мінус» — експорт енергосистемою ЕЕС2). За первинними СЧХ ЕЕС1 і

<sup>1</sup>У випадку окремого функціонування електроенергосистем частота в ЕЕС1 після перехідного процесу визначилась би точкою перетину її СЧХ  $P_{н1}(f)$  і  $P'_{т1}(f)$  на рівні  $f''_0 < f'_0$ .

відхилення частоти  $\Delta f$  знаходимо  $P'_{нб1} = -k_{жф1} \Delta f = -(k_{н1} - k_{т1}) \Delta f = -k_{н1} \Delta f$ , оскільки коефіцієнт крутизни  $k_{т1} = 0$  (характеристика  $P_{т1}(f)$  на рисунку є паралельною осі частоти). Тоді початкове значення небалансу потужності  $P_{нб1}$ , що виник в ЕЕС1, буде

$$P_{нб1} = -k_{жф1} \Delta f + \Delta P_{\Sigma мс}. \quad (5)$$



Згідно з вимогами [1] система вторинного АРЧП в ЕЕС1 має в такий спосіб впливати на регулювальні станції, щоб приріст потужності вторинного регулювання в ЕЕС1  $\Delta P_{вр1}$  компенсував небаланс потужності (5) з протилежним знаком. Тобто,  $\Delta P_{вр1} = k_{жф1} \Delta f - \Delta P_{\Sigma мс}$ . З урахуванням  $\Delta f = f - f_0$  і  $\Delta P_{\Sigma мс} = P_{\Sigma мс} - P_{\Sigma мс0}$  отримуємо:

$$\Delta P_{вр1} = k_{жф1} (f - f_0) - (P_{\Sigma мс} - P_{\Sigma мс0}); \quad (6)$$

$$f - f_0 \rightarrow 0; \quad P_{\Sigma мс} - P_{\Sigma мс0} \rightarrow 0.$$

де  $P_{\Sigma мс}$  і  $P_{\Sigma мс0}$  — поточне і планове значення сальдо міжсистемних перетікань активної потужності, МВт.

Вираз (6) є законом вторинного автоматичного регулювання частоти і сальдо перетікань активної потужності для ЕЕС1. Природно припустити, що САРЧП енергосистеми ЕЕС2 також має діяти подібно до (6) так, щоб повністю ліквідувати небаланс в своїй енергосистемі і вивести режим за частотою і перетіканням на задані (планові) значення

$$\Delta P_{вр2} = k_{жф2} (f - f_0) - (P_{\Sigma мс} - P_{\Sigma мс0}); \quad f - f_0 \rightarrow 0; \quad P_{\Sigma мс} - P_{\Sigma мс0} \rightarrow 0. \quad (7)$$

Оскільки зміни міжсистемних перетікань активної потужності можливі тільки у разі відхилення частоти, то за  $\Delta f = 0$  отримуємо  $\Delta P_{\Sigma мс} = 0$ . Тобто, в процесі ліквідації небалансу потужності в енергосистемі системою АРЧП обидва доданки в законі вторинного регулювання будуть прагнути до нуля. Це безпосередньо впливає і з самого закону вторинного регулювання (6). Оскільки для ЕЕС1  $\Delta P_{\Sigma мс} = P'_{нб2} = -k_{жф2} \Delta f$ , то підставляючи вираз збільшення міжсистемного перетікання в (6), отримуємо:

$$\Delta P_{вр1} = k_{жф1} \Delta f + k_{жф2} \Delta f = (k_{жф1} + k_{жф2}) \Delta f = k_{жф} \Delta f,$$

де  $k_{жф} = k_{жф1} + k_{жф2}$  — коефіцієнт жорсткості по частоті усього енергооб'єднання. Таким чином, у разі дії збурень у одній з енергосистем її САРЧП регулює частоту в усьому енергооб'єднанні, ліквідуючи власний небаланс потужності. Це узгоджується з вимогами функціонування об'єднаної енергосистеми ENTSO-E.

Діючи за аналогією, нескладно показати, що  $\Delta P_{вр2} = k_{жф2} \Delta f - k_{жф2} \Delta f = 0$ . Тобто, САРЧП енергосистеми ЕЕС2 не реагує на небаланси потужності, які виникають в сусідній енергосистемі ЕЕС1, і не активує в таких випадках свої засоби для участі у процесах вторинного АРЧП. Це також відповідає вимогам і правилам об'єднаної енергосистеми ENTSO-E.

Здійснення регулювання частоти і сальдо перетікань активної потужності у разі виникнення небалансів потужності лише у межах своєї електроенергосистеми, а також відсутність реагування своїми засобами вторинного регулювання АРЧП на небаланси, які виникають в інших ЕЕС, що функціонують сумісно, відповідає економічним інтересам теплових електростанцій (ТЕС) з регулювальними енергоблоками.

Втім, процеси вторинного автоматичного регулювання частоти й потужності не будуть технічно та економічно оптимальними, якщо значення коефіцієнта підсилення за частотою вторинних регуляторів будуть відрізнятися від дійсних поточних значень коефіцієнтів  $k_{жф}$  енергосистем. Оскільки у разі виникнення небалансу в енергосистемі ЕЕС1 міжсистемне перетікання потужності

зміниться на  $\Delta P_{\Sigma mc} = \pm k_{ж2} \Delta f$ , то за розбіжності значень коефіцієнтів підсилення за частотою вторинних регуляторів з дійсними значеннями коефіцієнтів жорсткості енергосистем по частоті законів вторинного регулювання (6) і (7) для ЕЕС1 і ЕЕС2 відповідно матимуть такий вигляд:

$$\Delta P'_{вр1} = (k_{ж1} + \Delta k_1) \Delta f + k_{ж2} \Delta f = k_{ж1} \Delta f + \Delta k_1 \Delta f = \Delta P_{вр1} + \Delta k_1 \Delta f \neq |P_{нб1}|;$$

$$\Delta P'_{вр2} = (k_{ж2} + \Delta k_2) \Delta f - k_{ж2} \Delta f = \Delta k_2 \Delta f \neq 0,$$

де  $k_{ж1} = k_{ж1} + k_{ж2}$  — коефіцієнт жорсткості по частоті усього енергооб'єднання.

Помічаємо, що в цьому випадку за умови дії зовнішніх збурень САРЧП енергосистеми ЕЕС2 буде реагувати і, діючи на свої регулювальні електростанції, виробляти незатребувану потужність вторинного регулювання  $\Delta P'_{вр2} = \Delta k_2 \Delta f$ . Водночас, у збуреній електроенергосистемі (ЕЕС1) невідповідність значень зазначених коефіцієнтів на  $\Delta k_1$  також призведе до непередбачених змін генерованої потужності вторинного регулювання  $\Delta P'_{вр1} = k_{ж1} \Delta f + \Delta k_1 \Delta f = \Delta P_{вр1} + \Delta k_1 \Delta f$  на величину доданка  $\Delta k_1 \Delta f$ . При цьому між енергосистемами будуть виникати змінні у часі зрівнювальні перетікання потужності, що надмірно завантажують міжсистемні зв'язки та можуть призводити до коливань режимних параметрів і навіть втрати стійкості ОЕС.

На завершення окремо зазначимо, що склад енергетичного устаткування кожної ЕЕС — генерувального, та електропристроїв, які споживають електричну енергію — змінюється протягом доби; крім того, кожний тип енергетичного обладнання має свої певні частотні характеристики. Відтак, властивості функцій сумарних СЧХ  $P_{\Sigma n}(f)$  і  $P_{\Sigma r}(f)$  також змінюються у часі, що зрештою призводить до зміни у часі значень коефіцієнта жорсткості енергосистеми  $k_{ж1}$ . За нинішньої практики коефіцієнти підсилення за частотою вторинних регуляторів в ОЕС України та ЄЕС Росії встановлюються постійними, а у Європейській ENTSO-E переглядаються лише одноразово протягом року. Використання в САРЧП постійних коефіцієнтів підсилення за частотою пов'язано перш за все з відсутністю апробованих методів швидкого й точного визначення поточних значень коефіцієнтів жорсткості енергосистем за частотою.

### Висновки

1. На основі первинних статичних частотних характеристик  $P_{\Sigma n}(f)$  і  $P_{\Sigma r}(f)$  електроенергосистем отримані вирази для вторинного регулювання частоти і потужності як для ізольованої енергосистеми, так і для ЕЕС, що функціонують паралельно.

2. Доведено, що вторинне АРЧП буде технічно і економічно оптимальним лише за умови підтримання значень коефіцієнтів підсилення за частотою на рівні поточних значень коефіцієнтів  $k_{ж1}$ . Такі коефіцієнти визначаються як різниця коефіцієнтів крутизни первинних статичних частотних характеристик (СЧХ)  $P_{\Sigma n}(f)$  і  $P_{\Sigma r}(f)$  цих ЕЕС:  $k_{ж1} = k_n - k_r$ .

3. Показано, що зі зміною значень коефіцієнта підсилення за частотою в САРЧП відносно значень коефіцієнтів жорсткості ЕЕС по частоті можуть бути отримані вторинні СЧХ об'єднаної енергосистеми (ОЕС) з наперед заданими властивостями.

4. Через відсутність апробованих методів швидкого і точного визначення поточних значень коефіцієнтів жорсткості СЧХ електроенергосистем у нинішній практиці коефіцієнти підсилення контурів системи вторинного АРЧП за відхиленням частоти задаються незмінними. Дійсні вторинні СЧХ ОЕС залишаються невизначеними, що погіршує якість процесів вторинного АРЧП та в цілому призводить до зниження техніко-економічних показників режимів міжсистемних зв'язків ОЕС, а також до збільшення питомих експлуатаційних витрат енергоблоків ТЕС, що беруть участь у процесах АРЧП.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. UCTE OH — Policy 1: Load-Frequency Control // UCTE OH Policy — Final Version. Approved by SC on 19 March 2009.
2. Сидоров А. Ф. Статические характеристики энергосистем по частоте и их свойства / А. Ф. Сидоров // Технічна електродинаміка. — 2000. — № 3. — С. 61—68.
3. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1985. — 536 с.
4. Костюк О. М. Элементы теории устойчивости энергосистем. — К. : Наук. думка, 1983. — 296 с.
5. Стационарные режимы и параметры статических частотных характеристик энергосистемы / [Сидоров А. Ф., Воевода А. И., Редин В. И., Денисевич К. Б.] // Новини енергетики. — 2000. — № 4. — С. 52—58.
6. Настанова СОУ-Н ЕЕ ЯЕК 04.156:2009. Основні вимоги щодо регулювання частоти та потужності в ОЕС України

(затверджено 24.03.2009 р.). — 54 с.

7. Сидоров А. Ф. О нормировании жесткости режимов энергосистемы по частоте / А. Ф. Сидоров // Новини енергетики. — 2000. — № 11. — С. 47—51.

8. Сидоров А. Ф. Аварийные небалансы в энергосистеме и первичные статические частотные характеристики / А. Ф. Сидоров // Новини енергетики. — 2000. — № 9. — С. 48—55.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.12.2017

**Костюк Василь Осипович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропостачання, e-mail: vasyk.kostiuk@gmail.com ;

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ;

**Сидоров Олександр Федорович** — провідний інженер диспетчерської служби.

ДП «НЕК «Укренерго», Київ

**V. O. Kostiuk<sup>1</sup>**  
**O. F. Sidorov<sup>2</sup>**

## The Method of Optimum Secondary Frequency Regulating and Power

<sup>1</sup> Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;

<sup>2</sup>SC“NEK “Ukrenergo”, Kyiv

*There have been presented the conditions under which the technical and economic parameters of the processes of secondary frequency and power regulation in the electric power system (EPS) can be close to optimal. It has been shown that in order to fulfill these conditions it is sufficient to maintain the gain of the system of secondary automatic frequency and power control according to the frequency deviation at the level of the numerical value of EPS stiffness factor with respect of frequency.*

**Keywords:** electric power system, mechanical generation power, active electrical power consumption, primary frequency characteristics, primary and secondary frequency and power control.

**Kostiuk Vasyl O.** — Ph.D., Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Power Supply, e-mail: vasyk.kostiuk@gmail.com ;

**Sidorov Oleksandr F.** — Leading Engineer of Dispatching Service

**В. О. Костюк<sup>1</sup>**  
**А. Ф. Сидоров<sup>2</sup>**

## Один из способов оптимального вторичного регулирования частоты и мощности

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»;

<sup>2</sup>ГП «НЭК «Укрэнерго», Киев

*Изложены условия, при которых технико-экономические показатели процессов вторичного регулирования частоты и мощности в электроэнергосистеме (ЭЭС) могут быть близкими к оптимальным. Показано, что для выполнения таких условий достаточно поддерживать коэффициент усиления системы вторичного автоматического регулирования частоты и мощности по отклонению частоты на уровне числового значения действительного коэффициента жесткости ЭЭС по частоте.*

**Ключевые слова:** электроэнергосистема, механическая мощность генерирования, активная электрическая мощность потребления, первичные частотные характеристики, первичное и вторичное регулирование частоты и мощности.

**Костюк Василий Осипович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения, e-mail: vasyk.kostiuk@gmail.com ;

**Сидоров Александр Федорович** — ведущий инженер диспетчерской службы