

Відділення фізико-технічних проблем енергетики
Національної академії наук України
Інститут електродинаміки

ПРАЦІ

Інституту електродинаміки Національної академії наук України

Збірник наукових праць

Виходить тричі на рік

Засновано у 1999 році

Спеціальний випуск

Київ
2010

УДК 621.3+621.313+621.314

*Друкується за постановою вченої ради
Інституту електродинаміки Національної академії наук України.
Протокол № 7 від 24 червня 2010 року.*

Зареєстровано 07.02.2002. Свідоцтво: серія КВ, № 5843.

Засновник та видавець: Інститут електродинаміки НАН України
Україна, 03057, м. Київ, пр. Перемоги, 56

Редакційна колегія:

Головний редактор:

Кириленко О.В., акад. НАН України

Заступник головного редактора:

Антонов О.Є., докт. техн. наук

Члени редакційної колегії:

Гриневич Ф. Б.	академік НАН України
Стогній Б.С.	академік НАН України
Счастливий Г.Г.	академік НАН України
Шидловський А.К.	академік НАН України
Волков І.В.	член-кореспондент НАН України
Кузнецов В.Г.	член-кореспондент НАН України
Резцов В.Ф.	член-кореспондент НАН України
Розов В.Ю.	член-кореспондент НАН України
Таранов С.Г.	член-кореспондент НАН України
Титко О.І.	член-кореспондент НАН України
Шидловська Н.А.	член-кореспондент НАН України
Щерба А.А.	член-кореспондент НАН України
Авраменко В.М.	доктор технічних наук
Буткевич О.Ф.	доктор технічних наук
Васецький Ю.М.	доктор технічних наук
Кондратенко І.П.	доктор технічних наук
Липківський К.О.	доктор технічних наук
Монастирський З.Я.	доктор технічних наук
Новік А.І.	доктор технічних наук
Римша В.В.	доктор технічних наук
Юрченко М.М.	доктор технічних наук

Відповідальний за випуск: *Денисюк С. П.*

Адреса редколегії:

Україна, 03057, м. Київ, пр. Перемоги, 56
Інститут електродинаміки НАН України

ISSN 1727-9895

© Інститут електродинаміки НАН України

**Праці
Інституту електродинаміки
Національної академії наук України**

Спеціальний випуск

2010 р.

ЗМІСТ

<i>Стогній Б.С.</i> Вступне слово.....	5
<i>Стогній Б.С.</i> Сталій розвиток енергетики та інтелектуальні енергетичні системи.....	6
<i>Кириленко О.В., Праховник А.В.</i> Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови.....	10
<i>Кириленко А.В., Якименко Ю.И., Жуйков В.П., Денисюк С.П.</i> Преобразователи параметров электроэнергии в Smart системах энергетики.....	17
<i>Kurytnik Igor P., Worowik B.</i> Problems of Power Transmission and Energy Storage in ESS.....	24
<i>Сокол Е.И., Гончаров Ю.П., Замаруев В.В., Ивахно В.В., Кривошеев С.Ю., Вейцман П.Л., Иванов А.Е., Чернетченко М.А.</i> Использование средств силовой электроники для создания новых технологий в системе передачи электрической энергии.....	30
<i>Лежнюк П.Д.</i> , Принцип наименьшего действия как механизм самооптимизации режимов электроэнергетических систем.....	35
<i>Кириленко О.В., Прихно В.Л., Рибіна О.Б.</i> Ієрархічні принципи формування моделей та моделювання режимів електроенергетичних систем.....	41
<i>Праховник А.В., Ковальчук А.М., Демиденко С.К. Савченко А.С.</i> Мікроенергосистеми: побудова мікросистем та віртуальних станцій.....	47
<i>Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Пилипенко Ю.В.</i> Мониторинг электроэнергетических объектов и режимов работы электроэнергетических систем.....	53
<i>Сегеда М.С., Равлик Н.О., Дудурич О.Б., Бакало Г.Ш.</i> Оптимізація роботи генераторів енергоблоків когенераційної установки під час паралельної роботи з електричною мережею.....	57
<i>Попов В.А., Ткаченко В.В., Луцько Е.С.</i> Пути рационального формирования и управления режимами интегрированных систем электроснабжения.....	60
<i>Варецький Ю.О., Наконечний Т.І.</i> Принципи побудови інтелектуальної системи моніторингу несинусоїдального режиму електричної мережі.....	66
<i>Буткевич О.Ф., Чижевський В.В.</i> Деякі аспекти моніторингу низькочастотних коливань режимів параметрів енергооб'єднань.....	72
<i>Стахів П.Г., Гоголюк О.П., Рендзіняк С.Й.</i> Розрахунок перехідних процесів електроенергетичних систем у часовій області з використанням сучасних комп'ютерних середовищ.....	78
<i>Кириленко О.В., Танкевич Є.М., Танкевич С.Є.</i> Інтелектуальні вимірювальні перетворювачі струму та напруги для інтелектуальних систем.....	82
<i>Младенов О.Г., Колева Е., Богдан О.В., Співак В.М., Якименко Ю.І.</i> Інтегральні біосенсорні системи на основі нанокристалічного кремнію.....	87
<i>Волошко А.В., Лутчин Т.Н.</i> Локальне відновлення закової інформації.....	93
<i>Коцар О.В.</i> Застосування АСКОВЕ для керування режимами електроспоживання в умовах функціонування ринку двосторонніх договорів та балансуєчого ринку.....	97
<i>Стогній Б.С., Слынько В.М., Ищенко О.А.</i> Метрологическое обеспечение, сертификация и стандартизация аппаратно-программных информационно-измерительных диагностических комплексов в электроэнергетике.....	103
<i>Прокопенко В.В., Кравченко К.Ю.</i> Дослідження сучасних інтелектуальних енергосистем.....	107
<i>Випанасенко С.І.</i> Управління енергоефективністю процесу вуглевидобутку.....	111
<i>Сегеда М.С., Міняйло О.С., Покровський К.Б., Олійник В.П.</i> Математична модель послідовного трансформатора для плавного регулювання напруги.....	116
<i>Zakis J., Vinnikov D., Roasto I., Strzelecki R.</i> Experimental study of operating conditions of IGBTs in qZSI based DC/DC converter.....	119
<i>Денисюк С.П., Рибіна О.Б., Дерев'янюк Д.Г.</i> Аналіз електромагнітної сумісності елементів систем електропостачання при змінних параметрах генератора та навантажень.....	123

Ковальчук О.А., Лежнюк П.Д., Кулик В.В. Автоматизація оптимального керування відновлюваними джерелами енергії в електричних мережах.....	131
Тутик В.Л., Пилипенко Ю.В., Камінський Р.Б., Тарасевич П.Й., Невечера І.В., Стретович В. М. Засоби моніторингу систем електропостачання Залізниць.....	135
Трач І.В., Зубок Ю.П. Оцінювання параметрів пасивних елементів систем електротехнології в реальному часі.....	139
Богдан О.В., Івацук А.В., Якименко Ю.І. Перспективи сонячної енергетики в Україні: основні завдання та параметри розвитку на період до 2030 р.....	143
Інишеков Є.М. Шляхи досягнення екоенергетичної безпеки при Формуванні енергетики сталого розвитку.....	149
Радиш І.П., Пертко П.П., Гуз В.П. Особливості сучасних методів організації центрів обробки даних ЦОД та необхідність їх використання в електроенергетичному секторі України.....	153
Venusek G. Efficiency improvement services to grids provided with inverter interfaced Distributed Generation.....	158
Денисюк С.П., Сафроненко Є.В., Радиш І.П. Оптимізація режиму роботи системи електроживлення з перетворювачами електроенергії.....	164
Добровольська Л.Н., Віт І.О., Чайка І.П., Штогрін Є.А. Технічні засоби управління компенсуючими установками в інтелектуальній енергетичній системі.....	171
Інишеков Є.М., Решетняк К.О. Застосування інтелектуальних систем прийняття рішень для проектів з енергозбереження з урахуванням еколого-кліматичних факторів.....	175
Дивак М.П., Пукас А.В., Марценюк Є.О. Інтервальні дискретні динамічні моделі виробництва біогазу з побутових органічних відходів.....	179
Марьинских Ю.М., Акуленко В.Л., Пенелаяв И.А. Солнечные энергостанции космического базирования – одно из направлений энергетики устойчивого развития.....	185
Марьинских Ю.М. Полифункциональный энергомодуль на возобновляемых источниках энергии с интеграционными свойствами.....	188
Andrijanovich A., Egorov M., Vinnikov D., Strzelecki R. Multiport DC/DC Converter for Interfacing of Hydrogen Buffer with Wind Turbine.....	191
Жуйков В.Я., Количенко М.Е. Исследование хаотических процессов в широтно-импульсном преобразователе.....	195
Прокопенко В.В., Кульбачний П.В. Питання електромагнітної сумісності при управлінні електротермічними установками.....	199
Гаврикова А.О. «Умные» сети для систем централизованного теплоснабжения в условиях конкурентного рынка тепловой энергии.....	203
Бірюкова-Стефанюк М.Ю., Дешко В.І., Дубровська В.В. Аспекти ефективності системної роботи теплових насосів «повітря-повітря».....	207
Григор'єв Р.В. Перспективи розвитку розосередженої генерації на базі мікроТЕЦ у житловому секторі.....	211
Борсук Є., Сидоренко К.М. Інтеграція малопотужної вітроелектричної установки та відкрита архітектура.....	217
Петергеря Ю.С., Хижняк Т.А., Блінов І.В., Чопик В.В. Основні аспекти побудови та функціонування енергоефективних систем керування локальних об'єктів.....	219
Стогній О.В., Добровольський В.К. Прогнозування енергозабезпечення в умовах сталого розвитку.....	224
Наші автори	227

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

С.П. Денисюк*, Є.В. Сафроненко*, І.П. Радиш**

* Національний технічний університет України «КПІ»,
вул. Боршлагівська, 103, м. Київ, 03056, Україна

** Мукачівський державний університет
вул. Ужгородська, 26, м. Мукачево, 89600, Україна

Annotation – the problem of optimization of power system with converters were provided to minimize peak and current values of power of generator. An adjustment features to minimize power takeoff system, which contains a generator and two power electronic devices were obtained.

Key words – optimization of power system, power electronic devices, converters.

Побудова інтелектуальних енергетичних систем, як перспективного напрямку розвитку електроенергетики ХХІ ст., поєднує в собі елементи традиційної енергетики та новітні енергетичні технології, у тому числі нетрадиційні відновлювані джерела енергії, різні типи перетворювачів електроенергії (ПЕЕ), інформаційні технології та засоби комунікації. Використання ПЕЕ забезпечує кращу адаптацію до енергомережі пристроїв розосередженої генерації та нетрадиційних відновлюваних джерел енергії.

Визначимо, що система електроживлення з ПЕЕ (СПЕЕ) оптимальна для заданої множини критеріїв, коли виконуються умови оптимальності по відношенню до їх структури, елементів та зв'язків між елементами [1–3]. Напрямами оптимізації СПЕЕ, що визначають вид цільової функції, є [3, 4]:

1) забезпечення електромагнітної сумісності елементів СПЕЕ, різних типів СПЕЕ між собою, СПЕЕ та навколишнього електромагнітного середовища;

2) досягнення мінімальної величини втрат електроенергії;

3) виконання вимог до якості електроенергії у вибраних контрольованих перетинах системи (наприклад, вимог до складових вищих гармонік сигналів, рівнів несиметрії тощо);

4) досягнення необхідних рівнів реактивної потужності, зворотних та циркулюючих потоків енергії у контрольованих перетинах системи;

5) забезпечення заданих екстремальних режимів (виконання обмежень на амплітудні значення функцій струму та напруги, рівні чи швидкість зміни накопиченої енергії в електромагнітному полі тощо).

Задачу параметричної та структурної оптимізації СПЕЕ можна представити як багатокритеріальну (векторну) задачу оптимізації кількох часткових цільових (скалярних) функцій (критеріїв якості) при наявності обмежень як на множину варійованих параметрів, так і на оптимізуемі функції [2]:

$$\begin{aligned} F_{\text{опт}}(X^*) &\rightarrow \text{opt}; F_{\text{опт}}(X^*) = (F_{\text{опт},1}(X^*), \\ &F_{\text{опт},2}(X^*), \dots, F_{\text{опт},k}(X^*)); \\ X^* &\in \Omega^*; X^* = (X^*_1, X^*_2, \dots, X^*_n); \\ H_{\text{оп}}(X^*) &= 0; \\ H_{\text{оп}}(X^*) &= (h_{\text{оп},1}(X^*), h_{\text{оп},2}(X^*), \dots, h_{\text{оп},l}(X^*)); \\ G_{\text{оп}}(X^*) &\geq 0; \\ G_{\text{оп}}(X^*) &= (g_{\text{оп},1}(X^*), g_{\text{оп},2}(X^*), \dots, g_{\text{оп},m}(X^*)); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Omega^* = \{ X^*: x_{a,i} \leq X^*_i \leq x_{b,i}, i = 1, \dots, n \},$$

де $F_{\text{опт}}(X^*)$ – цільова функція; X^* – вектор оптимізуемих параметрів; $H_{\text{оп}}(X^*)$, $G_{\text{оп}}(X^*)$ – функції, які накладають обмеження на область зміни змінних; $x_{a,i}$, $x_{b,i}$ – межі зміни оптимізуемих параметрів, що визначають простір Ω^* . Векторні функції X^* , $F_{\text{опт}}(X^*)$, $H_{\text{оп}}(X^*)$, $G_{\text{оп}}(X^*)$ формуються на основі компонентних, сигнальних та топологічних множин, характеристики системи та відповідних функціональних операторів.

Важливою складовою розв'язання задачі (1) є мінімізація амплітуди і діючого значення струму, що відбирається від генератора. Ця задача фактично передбачає мінімізацію складових потужності Фризе зміною режимів роботи навантажень [1–3]. В окремих випадках компенсацію складових потужності Фризе $Q_{\text{Ф}}$ можна досягти зміною режимів роботи навантажень в СПЕЕ. Розглянемо принципи керування колом, що складається із генератора напругою $u(t)$ з періодом T та паралельно підключених навантажень, з яких n' керованих та m' некерованих [1]. Під керованим навантаженням будемо розуміти i -те навантаження зі струмом $i_i^{(k)}(t, t_i^{(k)})$ та періодом енергетичних процесів $T_i^{(k)}$, для якого можливою є зміна часового зміщення $t_i^{(k)}$ умовного початку періоду $T_i^{(k)}$ відносно умовного початку періоду T генератора напруги без зміни величини активної потужності, що споживається. Під некерованим навантаженням будемо розуміти j -те навантаження зі струмом $i_j^{(n)}(t, t_j^{(n)})$ та періодом енергетичних процесів $T_j^{(n)}$, для якого величина $t_j^{(n)}$, що має аналогічний з величиною $t_i^{(k)}$ смисл, є незмінною. Струм генератора СПЕЕ у цьому випадку визначимо із співвідношення

$$i(t) = \sum_{i=1}^{n'} i_i^{(k)}(t; t_i^{(k)}) + \sum_{j=1}^{m'} i_j^{(n)}(t; t_j^{(n)}). \quad (2)$$

Вид кривої $i(t)$ в (2) залежить від інтервалів $t_i^{(k)}$, тому їх використання обумовлює зміни рівнів обмінної енергії та потужності Фризе. Задача системи керування i -ми навантаженнями зводиться до формування шляхом зміни інтервалів $t_i^{(k)}$ струму $i_i^{(k)}(t, t_i^{(k)})$ таким чином, щоб в контрольованому перетині усунути повернення енергії в генератор (здійснення компенсації $Q_{\text{Об}}$) чи зменшити втрати при передачі енергії (здійснення компенсації складових $Q_{\text{Ф}}$, $Q_{\text{Фт}}$).

У загальному випадку між струмом $i(t)$ та

напругою $u(t)$ існує залежність $i(t) = g(t)u(t)$, де миттєва провідність представляється сумою постійної та змінної складових, які для даного кола представимо у такому вигляді:

$$g_0 = \sum_{i=1}^{n'} g_{0i}^{(k)} + \sum_{j=1}^{m'} g_{0j}^{(h)}; \quad (3)$$

$$q_{\sim}(t) = q_{\sim}^{(k)}(t) + q_{\sim}^{(h)}(t); \quad (4)$$

$$g_{\sim}^{(k)}(t) = \sum_{i=1}^{n'} g_{\sim}^{(k)}(t, t_i^{(k)}); \quad (5)$$

$$g_{\sim}^{(h)}(t) = \sum_{j=1}^{m'} g_{\sim}^{(h)}(t, t_j^{(h)}), \quad (6)$$

де $q_{\sim}^{(k)}(t)$ та $q_{\sim}^{(h)}(t)$ – керована та некерована частини миттєвої провідності $g(t)$.

Якщо умовою компенсації Q_{Φ} , $Q_{\Phi\tau}$ є виконання рівності $g_{\sim}^{(k)}(t) = g_{\sim}^{(h)}(t)$ відповідно на періоді T та на інтервалі τ , то умовою компенсації обмінної потужності $Q_{об}$ є виконання співвідношення $g(t) > 0$.

Особливості оптимізації відбору потужності та максимального струму генераторів в СПЕЕ покажемо на прикладі системи з одним генератором, до якого підключено паралельно два ПЕЕ.

Нехай задана система, до складу якої входить один генератор постійної (E) чи змінної (синусоїдальної) напруги $e(t)$.

Генератори є генераторами необмеженої потужності. Системи електроживлення позначимо як СПЕЕ-1 (діє генератор постійної напруги E) та СПЕЕ-2 (діє генератор синусоїдальної напруги $e(t)$). СПЕЕ-1 та СПЕЕ-2 складаються із паралельно з'єднаних елементів:

- елементи СПЕЕ-1 – широтно-імпульсні перетворювачі (ШП) та інвертори;
- елементи СПЕЕ-2 – випрямлячі та регулятори змінної напруги (РЗН).

При цьому покладемо, що СПЕЕ-1 містить $n_{ш}$ ШП та n_i інверторів; СПЕЕ-2 містить n_b випрямлячів; n_p регуляторів змінної напруги. Надалі будемо розглядати однофазні еквіваленти системи СПЕЕ-1 та СПЕЕ-2.

Система СПЕЕ-1 описується наступними співвідношеннями:

- миттєвий струм генератора:

$$i_{Г}(t) = \sum_{j=1}^{n_{ш}} i_{ш,j}(t) + \sum_{j=1}^{n_i} i_{i,j}(t), \quad (7)$$

де $i_{ш,j}(t)$ – миттєвий струм j -го генератора; $i_{i,j}(t)$ – миттєвий струм j -го інвертора;

- середнє значення струму генератора:

$$I_{ср1} = \sum_{j=1}^{n_{ш}} \frac{1}{T_j} \int_0^{T_j} i_{ш,j}(t) dt;$$

$$I_{ср2} = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{T_j} \int_0^{T_j} i_{i,j}(t) dt;$$

$$I_{ср} = \sum_{l=1}^{n_1} \frac{1}{T_l} \int_0^{T_l} i_{Г,l}(t) dt,$$

- максимальне значення струму генератора:

$$I_{Г,маx}(t) = \max \left\{ \sum_{j=1}^{n_{ш}} i_{ш,j}(t) + \sum_{j=1}^{n_i} i_{i,j}(t) \right\}, \quad (8)$$

де

$$i_{Г,l}(t) = i_{E,l}(t), \quad l = 1, \dots, n_{ш};$$

$$i_{Г,l}(t) = i_{i,l}(t), \quad l = n_{ш} + 1, \dots, n_1.$$

Система СПЕЕ-2 описується наступними співвідношеннями:

- миттєвий струм генератора:

$$i_{Г}(t) = \sum_{j=1}^{n_b} i_{B,j}(t) + \sum_{j=1}^{n_p} i_{P,j}(t), \quad (9)$$

де $i_{B,j}(t)$ – миттєвий струм j -го випрямляча; $i_{P,j}(t)$ – миттєвий струм j -го РЗН;

- діюче значення струму генератора:

$$I_{д} = (1 / T_{Г}) \sqrt{\int_0^{T_{Г}} i_{Г}^2(t) dt}; \quad T_{Г} = HCK \left\{ T_j', j' \leq 1, n_b; T_j'', j'' \leq 1, n_p \right\}. \quad (10)$$

Для формування оптимізаційних процедур визначимо критерії регулювання для кожного із типів ПЕЕ – ШП, інверторів, випрямлячів та РЗН. При цьому задамо, що ПЕЕ працюють в ustalеному режимі згідно з сформульованими вимогами до рівня напруги (струму) навантаження. Параметрами регулювання є кути регулювання α (включення / виключення) вентильних елементів ПЕЕ.

Метою оптимізаційної процедури є мінімізація інтегральних характеристик:

- для генератора постійної напруги: максимального значення струму; розмаху пульсацій струму відносно середнього значення струму; коефіцієнта пульсацій;

- для генератора синусоїдальної напруги: максимального значення струму; діючого значення струму; коефіцієнта пульсацій.

Оптимізація режимів електроживлення передбачає мінімізацію для СПЕЕ-1: максимального значення $I_{Г,маx}$, розмаху пульсацій струму відносно середнього значення струму $\Delta I = I_{Г,маx} - I_{Г,ср}$, коефіцієнта пульсацій $K_{п}$; для СПЕЕ-2: максимального значення струму $I_{маx}$, діючого значення струму $I_{д}$, коефіцієнта пульсацій $K_{п(i)}$.

Нижче наведемо характеристики роботи кожного типу ПЕЕ, регулюючий параметр та межі зміни регулюючого параметра.

ШПД. Для j -го ШПД задано період роботи $T_j: [0, T_j]$. Початковий момент включення Δt_j змінюється в межах: $[\Delta t_j; \Delta t_j + T_j]$, де $0 < \Delta t_j < T_j$.

Інвертор. Для j -го інвертора задано період роботи $T_j: [0, T_j]$; $f_j = \frac{1}{T_j}$. Початковий момент Δt_j змінюється в межах $[\Delta t_j; \Delta t_j + T_j]$; $0 < \Delta t_j < T_j$.

Випрямляч. Для j -го випрямляча задано період роботи генератора $T_j: [0, T_j]$; $f_j = \frac{1}{T_j}$. Кути регулювання α_j змінюються в межах

$$\alpha_{ГР,j1} < \alpha_j < \alpha_{ГР,j2}; \alpha_{ГР,j} = \left(\frac{t_{ГР,j}}{T_j} \cdot 2\pi \right).$$

Для кожного типу випрямлячів в СПЕЕ-2 потрібно визначити $\alpha_{ГР,j}: t_{ГР,j} = \frac{\alpha_{ГР,j}}{2\pi} \cdot T_j$. У свою чергу, в залежності від типу випрямляча в системах керування необхідно враховувати можливу зміну кутів $\alpha_j \rightarrow \left(\frac{2\pi}{m} - \alpha_j \right)$.

Регулятор змінної напруги. Для j -го РЗН задано період роботи $T_j: [0, T_j]$; $f_j = \frac{1}{T_j}$. Кути регулювання α_j змінюються в межах

$$\alpha_{ГР,j1} < \alpha_j < \alpha_{ГР,j2}; \alpha_{ГР,j} = \left(\frac{t_{ГР,j}}{T_j} \cdot 2\pi \right).$$

Для кожного типу РЗН в СПЕЕ-2 потрібно визначити $\alpha_{ГР,j}: t_{ГР,j} = \frac{\alpha_{ГР,j}}{2\pi} \cdot T_j$.

У свою чергу, в залежності від типу РЗН в системах керування необхідно враховувати можливу зміну кутів $\alpha_j \rightarrow \left(\frac{2\pi}{m} - \alpha_j \right)$.

Оптимізаційна задача формується наступним чином:

– для СПЕЕ-1:

$$\Delta I = I_{Г,MAX} - I_{Г,CP} \rightarrow \min;$$

$$\Delta t_j - \text{var};$$

– для СПЕЕ-2:

$$I_{Г} \rightarrow \min; I_{MAX} \rightarrow \min; \alpha - \text{var};$$

Обмеження на зміну оптимізаційних змінних для СПЕЕ-1:

$$\left| I_{CP,Ш,j} - I_{CP,Ш,j,НОМ} \right| \leq \varepsilon_{Ш}; \varepsilon_{Ш} \geq 0;$$

$$\left| I_{1,(M),j} - I_{1,(M),j,НОМ} \right| \leq \varepsilon_{1,j}; \varepsilon_{1,j} \geq 0;$$

$$\left| T_j - T_{j,НОМ} \right| \leq \varepsilon_{1,2}; \varepsilon_{1,2} \geq 0$$

Обмеження на зміну оптимізаційних змінних для СПЕЕ-2:

$$\left| I_{d,B,j} - I_{d,B,j,НОМ} \right| \leq \varepsilon_B; \varepsilon_B \geq 0;$$

$$\left| I_{1,(M),P,j} - I_{1,(M),j,P,НОМ} \right| \leq \varepsilon_P; \varepsilon_P \geq 0.$$

У загальному випадку оптимізаційний процес ґрунтується на процедурі еквівалентування (згортання схеми). При оптимізації фактично здійснюється вирівнювання графіків навантаження генераторів (забезпечення рівномірності графіків споживання електроенергії навантаженнями).

Можливі різні конфігурації СПЕЕ. Потрібно враховувати, що до генераторів, окрім наведених пристроїв ПЕЕ, можуть бути підключені також лінійні навантаження (R, RL, RLC). При побудові більш складних (розгалужених) СПЕЕ виникає задача використання додаткових функціональних блоків, наприклад, фільтрів та трансформаторів. Для СПЕЕ у загальному випадку доцільно розраховувати питання оптимізації коефіцієнта трансформації трансформаторів і роботу пасивних фільтрів.

Наведемо критерії оптимального електроживлення для системи, яка містить один генератор та два навантаження, причому як моделі навантаження розглядаються R -, RL -навантаження.

Критерії оптимального електроживлення для СПЕЕ-1:

– система «1 генератор – (1 ШПД + 1 інвертор)»:

$$i_r(t) = i_{Ш}(t) + i_i(t); I_{CP1} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{Ш}(t) dt;$$

$$I_{CP2} = \frac{1}{T} \int_0^T i_1(t) dt; I_{CP} = \int_0^T i_r(t) dt;$$

$$I_{Г,MAX}(t) = \max \{ i_{Ш}(t) + i_i(t) \}.$$

– система «1 генератор – (1 інвертор + 1 лінійне R -навантаження)»:

$$i_r(t) = i_1(t) + i_R(t); I_{CP1} = \frac{1}{T} \int_0^T i_1(t) dt;$$

$$I_{CP2} = \frac{1}{T} \int_0^T i_R(t) dt = \frac{E}{R};$$

$$I_{CP} = \int_0^T i_r(t) dt;$$

$$I_{Г,MAX}(t) = \max \{ i_r(t) = i_1(t) + i_R(t) \} =$$

$$= \max \left\{ i_1(t) + \frac{E}{R} \right\}.$$

Критерії оптимального електроживлення для СПЕЕ-2:

– система «1 генератор – (1 випрямляч + 1 РЗН)»:

$$i_T(t) = i_B(t) + i_P(t); I_D = \frac{1}{T_T} \sqrt{\int_0^{T_T} i_T^2(t) dt}.$$

- система «1 генератор – (1 випрямляч 1 + лінійне RL-навантаження)»;

-

$$i_T(t) = i_B(t) + i_{RL}(t);$$

$$i_{RL}(t) = \frac{E_{1m}}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \times \sin \left(\omega t - \arctg \frac{\sqrt{R^2 + X_L^2}}{R} \right);$$

$$I_{MAX} = \max \{ i_B(t) + i_{RL}(t) \};$$

$$I_D = \frac{1}{T_T} \sqrt{\int_0^{T_T} i_T^2(t) dt} =$$

$$= \frac{1}{T_T} \sqrt{\int_0^{T_T} (i_B(t) + i_{RL}(t))^2 dt}.$$

Для схем з протиЕРС (E_0 та $e_0(t)$ – відповідно для систем СПЕЕ-1 та СПЕЕ-2) при формулюванні оптимізаційної задачі (згідно зі співвідношеннями (11) – (14)) необхідно враховувати дію еквівалентного генератора. Еквівалентний генератор може містити кілька періодичних складових (різних за тривалістю

періоду T_j) $E_j(t), j = 1, n_E$. В залежності від умов функціонування СПЕЕ при оптимізації може виникнути задача аналізу впливу періодичних з періодом $T_{IM} \neq T_{ПЕЕ}$ імпульсних завад довільної форми. Для оптимізації режимів роботи генератора в окремих випадках стає необхідним визначення

функцій $i_{max}(t); \frac{di(t)}{dt}; \frac{du(t)}{dt}$. При пошуку похідних

від миттєвих функцій $i(t), u(t)$ важливо оцінити як проявляється вплив різних типів завад на процеси в навантаженні і на рівні відбору потужності від генератора. У процесі організації оптимізаційної процедури при розгляді генераторів обмеженої потужності потрібно формувати ітераційну процедуру, в якій має враховуватися падіння напруги на внутрішньому опорі генератора.

Додатковими функціональними залежностями для оптимізації, які накладають обмеження на область зміни змінних, зокрема, формування законів керування, є:

1) характер впливу елементів один на одного, впливу окремих типів завад;

2) складові додаткових втрат (декомпозиція потужності Фризе);

$$Q_\phi = \sqrt{S^2 - P^2}; I_P^2 = \sum_{j=1}^{n_\phi} I_{P,j}^2.$$

3) миттєві значення реактивного струму:

$$i_P(t) = i(t) - \frac{P}{U^2} u(t).$$

Алгоритм оптимізації режимів відбору потужності та максимального струму генераторів у системі електроживлення включає наступні етапи:

1. Аналіз структури СПЕЕ.

2. Визначення параметрів регулювання:

$$\text{Пр} = \{ \bar{t}, \bar{\alpha} \}, \quad (11)$$

де \bar{t} – вектор моментів часу; $\bar{\alpha}$ – вектор кутів регулювання.

3. Визначення меж зміни параметрів регулювання

$$\bar{t}_{\min} \leq \bar{t} \leq \bar{t}_{\max}; \quad (12)$$

$$\bar{\alpha}_{\min} \leq \bar{\alpha} \leq \bar{\alpha}_{\max}. \quad (13)$$

4. Побудова вектора критеріїв регулювання

$$\bar{I}_\Sigma = \{ \bar{I}_{MAX}, \bar{I}_{CP}, \bar{I}_D, K_{II} \}. \quad (14)$$

5. Формування оптимізаційної задачі за співвідношеннями (11) – (14):

$$\begin{cases} F_P(\bar{I}_\Sigma, \text{Пр}) \rightarrow \text{extr}; \\ \bar{t}_{\min} \leq \bar{t} \leq \bar{t}_{\max}; \\ \bar{\alpha}_{\min} \leq \bar{\alpha} \leq \bar{\alpha}_{\max}. \end{cases} \quad (15)$$

6. Розв'язання оптимізаційної задачі (15) одним із методів векторної оптимізації.

Наведена оптимізаційна процедура може бути розширена за рахунок введення як критеріїв зміни функції в допустимих межах параметрів вихідного сигналу кожного з типів ПЕЕ.

Як складову оптимізаційного процесу згідно з наведеним алгоритмом розглянемо побудову регульованих характеристик в СПЕЕ-1 при різних типах перетворювачів. Для розв'язання поставленої задачі використаємо програмні комплекси Simulink та Matlab.

Паралельна робота автономного інвертора та широтно-імпульсного перетворювача.

Необхідно окреслити ряд параметрів, що так чи інакше впливають на характер процесу відбору потужності від джерела необмеженої потужності при паралельному живленні від нього ШПП та інвертора.

До таких параметрів належать: $\tau_{Ш}$ – постійна часу кола навантаження ШПП; τ_I – постійна часу кола навантаження інвертора; $\Delta t_{Ш}$ – затримка (зсув) фази ШПП; Δt_I – затримка (зсув) фази інвертора; $T_{i(Ш)}$ – ширина керуючого імпульсу ШПП; $T_{i(I)}$ – ширина керуючого імпульсу інвертора; $T_{Ш}$ – період роботи ШПП; T_I – період роботи інвертора.

Змінюючи певним чином наведені параметри і моделюючи процес паралельної роботи ШПІ та інвертора від джерела необмеженої потужності, можна досягти мінімального значення максимального струму, що забезпечить оптимальний відбір енергії від генератора.

У процесі моделювання отримуємо масив значень функціональної залежності:

$$I_{ГМАХ} = f(\tau_{Ш}, \tau_I, \Delta t_{Ш}, \Delta t_I, T_{i(Ш)}). \quad (16)$$

Причому $\tau_{Ш} = \tau_I$ на кожному етапі моделювання.

У результаті моделювання при $\Delta t_{Ш} = 0,05$ були отримані дані, зведені в табл. 1.

Згідно з табл. 1 отримуємо поверхню регульовальних характеристик, зображену на рис. 1. Окремі типи регульовальних характеристик представлено на рис. 2. У табл. 2 наведено дані, які відображають зменшення відбору максимального струму генератора шляхом регулювання моментів комутації вентилів ШПІ та інвертора (за даними рис. 2).

Паралельна робота двох широтно-імпульсних перетворювачів.

До параметрів, що впливають на перебіг процесу відбору потужності від джерела при паралельній роботі двох ШПІ, можна віднести: $\tau_{Ш(n)}$ – постійна часу кола навантаження n -го ШПІ; $\Delta t_{Ш(n)}$ – затримка (зсув) фази n -го ШПІ; $T_{i(Ш)(n)}$ – ширина керуючого імпульсу n -го ШПІ. Зміна цих параметрів (окремо або в комбінації) певним чином впливає на протікання процесу відбору потужності від генератора.

Аналізуючи результати моделювання, можна зробити висновок, що при рівних значеннях всіх параметрів обидва ШПІ однаково впливають на створення максимального струму відбору від джерела живлення. При моделюванні було побудовано сімейства характеристик, що описуються наступним співвідношенням:

$$I_{ГМАХ} = f(\tau_{Ш1}, \tau_{Ш2}, \Delta t_{Ш1}, T_{i(Ш)}). \quad (17)$$

Залежність максимального струму генератора від затримки фази ШПІ при $T_{i(Ш)} = 50\%$ та $T_{i(Ш)} = 75\%$ наведена відповідно на рис. 3 та 4. Подані на рис. 3 та 4 залежності дозволяють сформулювати регульовальні характеристики за мінімумом максимального струму генератора.

Паралельна робота двох інверторів.

До параметрів, що впливають на протікання процесу відбору потужності від джерела при

паралельній роботі двох автономних інверторів, можна віднести: $T_{i(I)}$ – ширина керуючого імпульсу інвертора; τ_I – постійна часу кола навантаження інвертора; Δt_I – затримка (зсув) фази інвертора. Зміна цих параметрів (окремо або в поєднанні) певним чином впливає на перебіг процесу відбору потужності від генератора. Залежність максимального струму генератора від Δt_I при $T_{i(I)} = 50\%$ показана на рис. 5.

Отже, метою оптимізаційної процедури є мінімізація інтегральних характеристик: для генератора постійної напруги: максимальне значення струму; розмах пульсацій струму відносно середнього значення струму; коефіцієнт пульсацій; для генератора синусоїдальної напруги: максимальне значення струму; діюче значення струму; коефіцієнт пульсацій.

Процес оптимізації базується на принципі взаємокомпенсації, де "вирівнювання" графіка споживання струму від генератора здійснюється за рахунок зміни моментів комутації вентилів, що забезпечують роботу різних ПЕЕ. При аналізі складних схем важливо здійснити побудову макромоделей, тобто задіяти процедуру еквівалентування СПЕЕ відносно вибраних (контрольованих) вузлів системи.

За результатами проведених розрахунків та моделювання були отримані функціональні залежності, що можуть бути використані для керування ПЕЕ з метою зниження максимального струму генератора СПЕЕ з паралельною роботою ПЕЕ.

[1] Баланс энергий в электрических цепях / Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П., Жуйков В.Я. и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.

[2] Денисюк С.П. Аналіз та оптимізація енергетичних характеристик систем з перетворювачами електричної енергії // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Системи електроживлення електротехнічних установок і комплексів". – 1999. – С. 129 – 134.

[3] Денисюк С.П. Загальні властивості енергетичних характеристик систем з перетворювачами електромагнітної енергії // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електроенергетика: 36 наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 1999. – С. 46 – 59.

[4] Денисюк С.П., Рибіна О.Б. Пріоритети в забезпеченні електромагнітної сумісності в електричних мережах України // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – Ч.1. – 2007. – С. 84 – 87.

Таблиця 1

$\tau_{III} \setminus \tau_1$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0,01	79,24	77,39	75,64	73,00	70,77	68,95	67,51	66,25	65,22	64,31
0,02	77,84	75,25	71,32	68,89	67,15	65,53	64,11	62,85	61,73	60,69
0,03	75,23	72,75	69,77	66,17	63,28	61,59	60,33	59,34	58,42	57,72
0,04	71,85	69,24	66,01	64,12	61,05	58,44	57,01	55,99	54,93	54,24
0,05	68,14	65,53	62,90	61,00	58,87	56,31	54,16	52,70	51,25	50,50
0,06	64,67	62,06	60,35	58,45	56,32	54,19	52,04	50,25	48,63	47,11
0,07	62,23	59,48	58,24	56,35	54,21	52,09	50,02	48,22	46,54	45,01
0,08	59,56	57,73	56,48	54,59	52,46	50,33	48,22	46,43	44,78	43,25
0,09	57,27	56,25	55,00	53,11	50,98	48,71	46,56	44,76	43,25	41,77
0,1	55,32	54,98	53,74	51,84	49,71	47,20	45,05	43,25	41,74	40,46

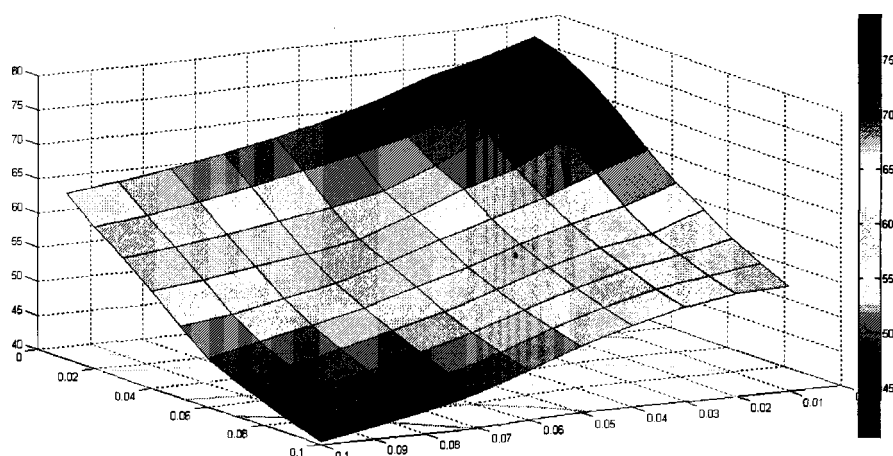


Рис. 1

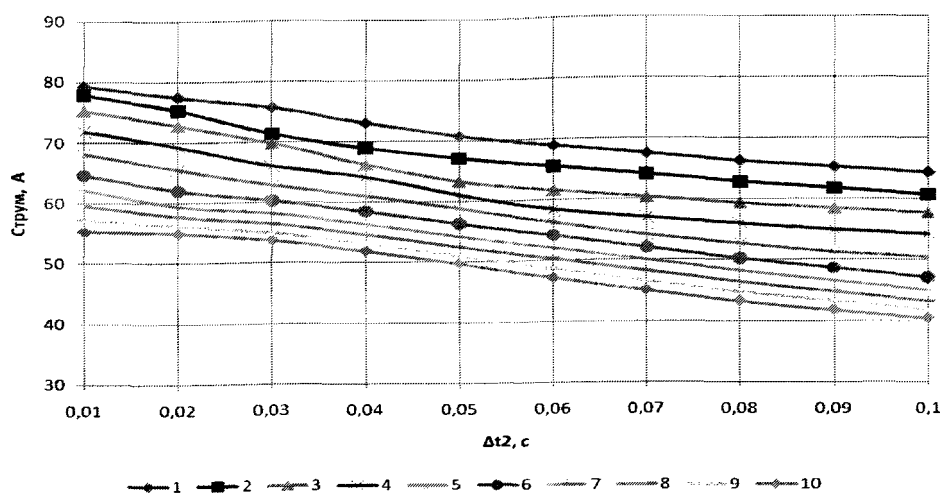


Рис. 2

Таблиця 2

Номер кривої	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Абсолютне значення, А	14,94	17,15	17,51	17,61	17,64	17,55	17,22	16,31	15,50	14,86
Відносне значення, %	18,85	22,03	23,28	24,51	25,88	27,14	27,67	27,38	27,07	26,87

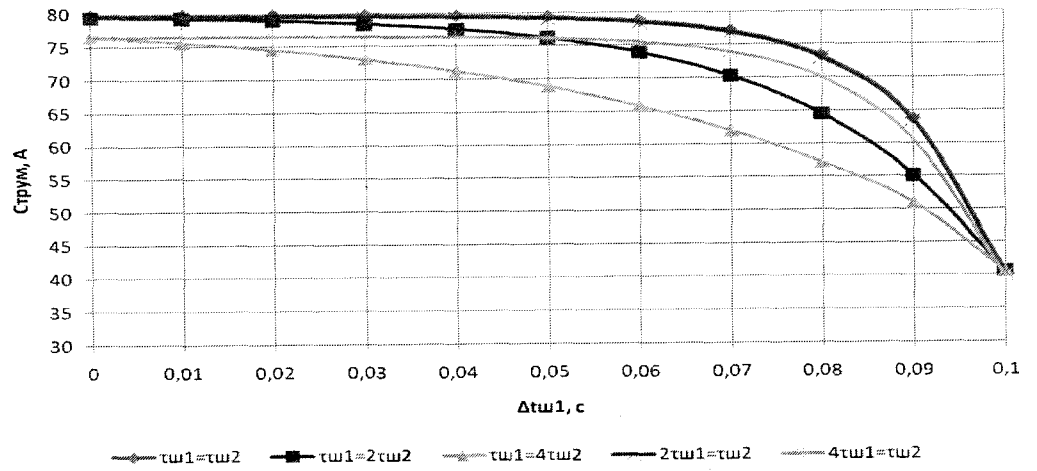


Рис. 3

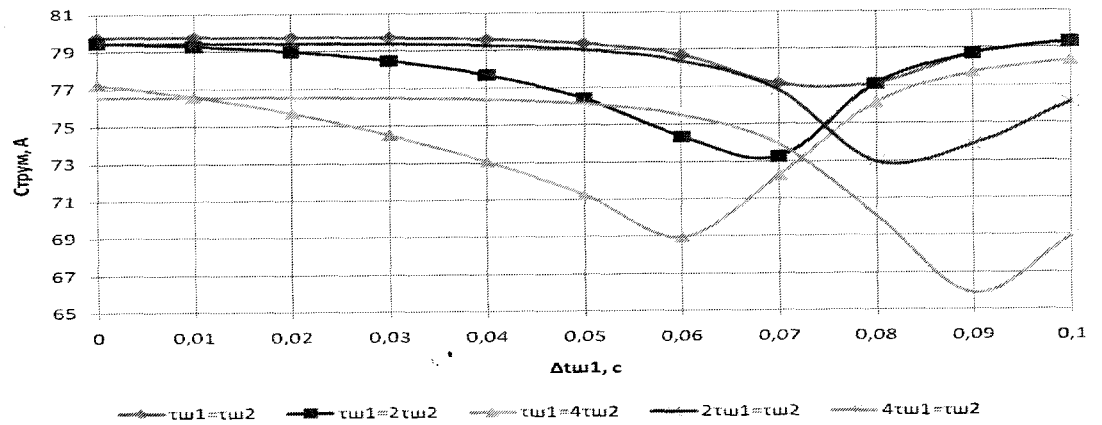


Рис. 4

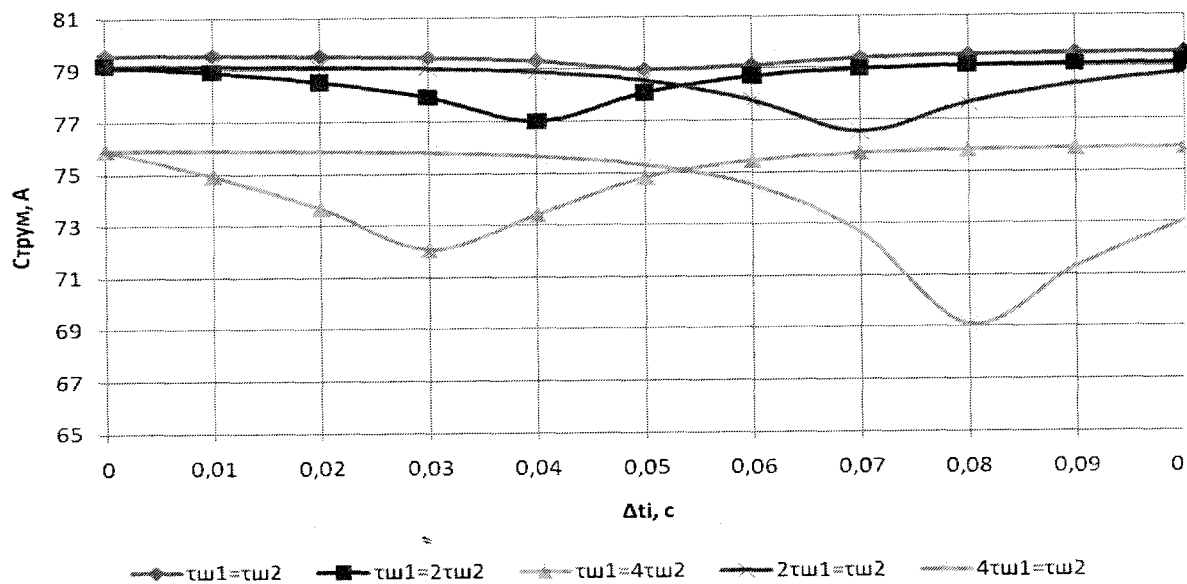


Рис. 5