

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ І РОЗРАХУНКІВ СКЛАДОВИХ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ ЖИВЛЕННЯ І КЕРУВАННЯ УСТАНОВКАМИ З НЕСТАБІЛЬНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

*Сінолиций А.П., д.т.н., проф., Кольсун В.А., к.т.н., ас., Дуб Є.С., асп.*

*Криворізький технічний університет*

*вул. XXII партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл., 50027, Україна*

*E-mail: Kolsun\_VA@3g.ua*

Проведений аналіз енергетичних режимів систем живлення та керування групи електроприводів із різкозмінними навантаженнями з використанням нетрадиційного методу на основі інтегральних співвідношень та елементів спектральної теорії нелінійних кіл. На прикладі екскаватору ЕКГ-4, б показано, що рівень реактивної складової потужності майже у 2 рази перевищує рівень активної, що встановлює вихідні передумови для вибору компенсуючих пристроїв.

**Ключові слова:** статичні перетворювачі, складові потужності, гармоніки струму, енергетична ефективність, групова система живлення і керування.

**Вступ.** Виробничі установки (механізми) з нестабільними та різкозмінними навантаженнями набули широкого застосування в різних галузях виробництва. Це створює специфічні умови формування енергобалансу в системах живлення і керування (СЖК) та вибору засобів компенсації неактивних складових потужності в їх силових ланках. Зважаючи на те, що такі установки і комплекси мають підвищену енергоємність, а їх СЖК містять статичні перетворювачі, питання щодо оптимізації якісних показників енергоспоживання і зниження втрат набувають першочергового значення. Слід зазначити, що за таких умов навантажень, вибір зовнішніх компенсуючих пристроїв у різних ланках СЖК досить складний і, як наведено в [1], потребує суттєвих витрат. Проте вибір регулюючих і компенсуючих пристроїв можливий лише за умов наявності повної і достовірної інформації щодо особливостей енергообмінних процесів, їх якісних і кількісних характеристик поодиноких і групових СЖК при нестабільних і різкозмінних навантаженнях. На цій підставі слід вважати, що розробка методів аналізу та розрахунків складових потужності, вибір засобів компенсації неактивних складових потужності в СЖК установками (комплексами) з нестабільними і різкозмінними навантаженнями є на цей час актуальними.

**Аналіз попередніх досліджень.** Переважна більшість досліджень і публікацій, яка стосується методів аналізу та розрахунків складових потужності установок (механізмів) з нестабільними та різкозмінними навантаженнями ґрунтується на використанні:

– математичних методів моделювання енергопроцесів на основі теорії ймовірностей та спеціальних статистичних теорій [2];

– інтегрального або спектрального методів [3], якими передбачене виконання проміжних графоаналітичних операцій по визначенню діючих значень струмів  $I_{1\Sigma}$  і гармонік  $I_{(k)\Sigma}$  згідно загальних співвідношень:

$$I_{1\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{2p} \int_0^T i_{1\Sigma}^2(\omega t) d\omega t};$$

$$I_{(k)\Sigma} = \frac{1}{2p} \sqrt{\left( \int_0^T i_{1\Sigma}(\omega t) \cos k\omega t d\omega t \right)^2 + \left( \int_0^T i_{1\Sigma}(\omega t) \sin k\omega t d\omega t \right)^2}, \quad (1)$$

де  $i_{1\Sigma}(\omega t)$  – миттєве значення (функція) графіку струму групової системи;  $\omega = 2\pi f$  – кругова частота ( $f$  – частота напруги мережі).

Відомий метод парно-векторного додавання діючих значень струмів (гармонік) реалізується у відповідно до виразу:

$$\bar{V}_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \bar{V}_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n \bar{V}_{\Sigma(i-1)} \bar{V}_i \cos(j_i - j_{\Sigma(i-1)})}, \quad (2)$$

де  $\bar{V}_i j_i$  – модуль та фаза вектору струму гармоніки  $i$ -го ПП відповідно;  $\bar{V}_{\Sigma(i-1)} j_{\Sigma(i-1)}$  – модуль і фаза результуючого вектора струму (гармоніки) попередньої суми відповідно.

Але при неперервній зміні графіків навантажень, з одного боку, і складності математичного опису функцій  $i_{1\Sigma}(t)$  – з іншого, на дискретних інтервалах і за цикл роботи поодиноких і групових установок (механізмів) практичне використання (1), (2) ускладнює побудову і реалізацію алгоритмів автоматизованого розрахунку складових повної потужності і гармонік, а ймовірнісні моделі при практичних розрахунках можуть бути використані лише на підставі попереднього визначення основних (базових) складових енергопроцесу. Слід також зазначити, що у більшості випадків розрахунки та вимір (в умовах діючих установок) складових повної потужності (переважно активної і реактивної) не пов'язані безпосередньо з отриманням інформації щодо формування як порядку, так і рівнів вищих гармонік струму. Аналіз і розрахунки енергопроцесів за більш широким спектром показників як вихідної передумови при обґрунтуванні компенсуючих пристроїв

передбачає використання нетрадиційного підходу, який ґрунтується на інтегральних співвідношеннях і спектральній теорії нелінійних кіл.

**Мета роботи.** Аналіз енергетичних режимів поодиноких і групових СЖК установками (механізмами) з нестабільними і різкозмінними навантаженнями, на підставі яких встановлюються вихідні передумови щодо вибору компенсуючих пристроїв індивідуального та загального (групового) призначення.

**Матеріал і результати дослідження.** Основними вихідними параметрами, якими характеризується вид навантаження, є графіки (осцилограми) струмів (моментів) і швидкостей (напруг) за певний термін (цикл) роботи установок (механізмів). Як приклад, на рис. 1 приведені фрагменти осцилограм струмів  $i_d(t)$  і швидкостей  $n(t)$  групового електроприводу екскаватора ЕКГ-4, 6. Осцилограми наведені в єдиному часовому масштабі з відповідними параметрами для механізмів підйому ( $i_{d1}, n_1$ ), натиску ( $i_{d2}, n_2$ ) і повороту ( $i_{d3}, n_3$ ) при живленні перетворювальних пристроїв від загальної мережі живлення (групового трансформатора). Осцилограми струмів  $i_{d1}, i_{d2}, i_{d3}$  відображують навантаження вказаних механізмів і приведені для ланок постійного струму систем ТП-Д, які використовуються у цей час в умовах виробництва.

Як відомо, одним із сучасних методів аналізу і розрахунків енергетичних характеристик установок з нестабільними і різкозмінними навантаженнями є структурно-аналітичний метод [4], який ґрунтується на використанні інтегральних співвідношень для складових активної і реактивної потужностей та елементів спектральної теорії кіл для визначення діючих значень струмів і гармонік. На цій підставі основні базові розрахункові співвідношення мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 P_{(1)\Sigma(\Delta t_j)} &= P_{d0} \sum_{i=1}^n K_{i(\Delta t_j)} C_{pi(\Delta t_j)}; \\
 Q_{(1)\Sigma(\Delta t_j)} &= P_{d0} \sum_{i=1}^n K_{i(\Delta t_j)} C'_{pi(\Delta t_j)}; \\
 I_{1\Sigma(\Delta t_j)} &= I_{1b} \sqrt{\sum_{k=1}^p \left[ \left( \sum_{i=1}^n A_{(k)i(\Delta t_j)} \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^n B_{(k)i(\Delta t_j)} \right)^2 \right]}; \\
 S_{\Sigma(\Delta t_j)} &= mUI_{1b} \sqrt{\sum_{k=1}^p \left[ \left( \sum_{i=1}^n A_{(k)i(\Delta t_j)} \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^n B_{(k)i(\Delta t_j)} \right)^2 \right]}; \\
 P_{C\Sigma(\Delta t_j)} &= \sqrt{S_{\Sigma(\Delta t_j)}^2 - \left( P_{\Sigma(\Delta t_j)}^2 + Q_{\Sigma(\Delta t_j)}^2 \right)};
 \end{aligned} \quad (3)$$

де  $P_{(1)\Sigma(\Delta t_j)}, Q_{(1)\Sigma(\Delta t_j)}$  – активна і реактивна складові повної потужності системи живлення групового електроприводу для дискретного інтервалу  $\Delta t_j$ ;  $P_{db}, I_{1b}$  – базисні значення активної потужності і первинного струму (приймаються для найбільш навантаженого механізму);  $K_{i(\Delta t_j)}$  – коефіцієнт навантаження  $i$ -го механізму в дискретному інтервалі  $\Delta t_j$ ;  $C_{pi(\Delta t_j)}, C'_{pi(\Delta t_j)}$  – ступінь регулювання та його похідна  $i$ -го перетворювача в дискретному інтервалі  $\Delta t_j$ ;  $m, U$  – число фаз і діюче значення напруги ме-

режі живлення;  $S_{\Sigma(\Delta t_j)}$  – повна потужність системи живлення групового електроприводу для дискретного інтервалу  $\Delta t_j$ ;  $A_{(k)i(\Delta t_j)}, B_{(k)i(\Delta t_j)}$  – косинусний і синусний коефіцієнти розкладання Фур'є вхідних струмів  $i$ -х перетворювачів, які визначають  $k$ -ті гармоніки  $I_{(k)\Sigma(\Delta t_j)}$  групової системи при  $i \in \{1, \dots, n\}$  та її первинний струм  $I_{1\Sigma(\Delta t_j)}$  при  $i \in \{1, \dots, p\}$  ( $p$  – розрахункове число гармонік) в дискретному інтервалі  $\Delta t_j$ .

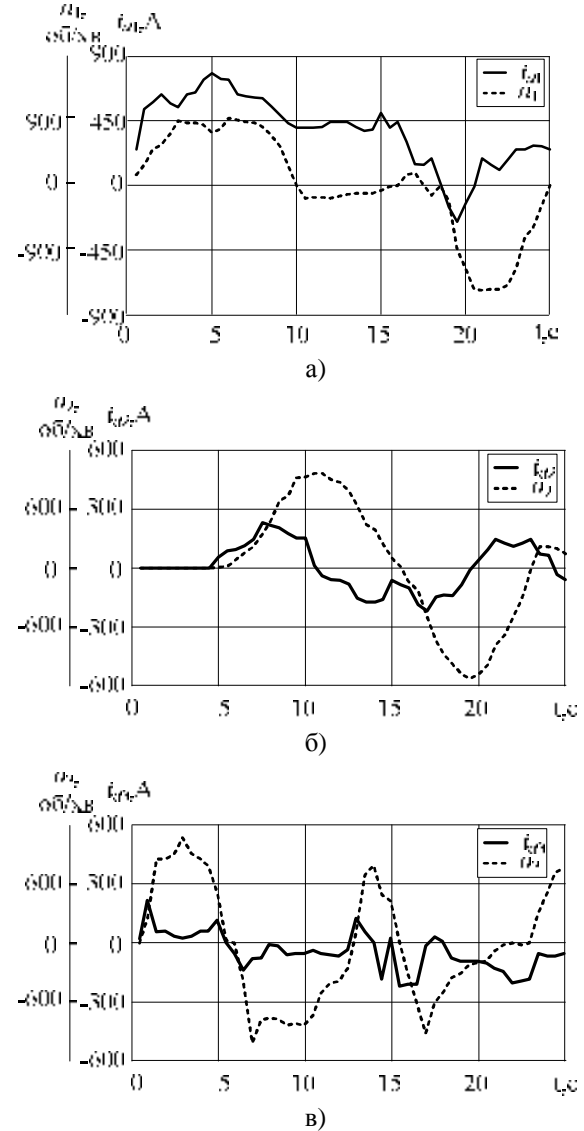


Рисунок 1 - Осцилограми струму та швидкості механізмів підйому (а), натиску (б) та повороту (в) групової СЖК екскаватора ЕКГ-4, 6

Використання співвідношень по (3) передбачає виконання ряду підготовчих операцій:

– навантажувальні  $i_d(t)$  та швидкісні  $n(t)$  діаграми (графіки) подаються в єдиному часовому масштабі циклу  $T_c$ ;

– у залежності від складності діаграм (особливо навантажувальних) і тривалості  $T_c$  вибираються дискретні інтервали  $\Delta t_j$  в межах від 0,01с до 1,0 с;

– для кожного із  $\Delta t_j$  визначаються  $C_{pi(\Delta t_j)}$  і їх похідні  $C'_{pi(\Delta t_j)}$ , а також коефіцієнти навантажень  $K_{i(\Delta t_j)}$  для кожного із механізмів згідно загальних співвідношень:

$$C_{pi(\Delta t_j)} = \frac{U_{di(\Delta t_j)}}{U_{dim}}; \quad C'_{pi(\Delta t_j)} = \frac{U'_{di(\Delta t_j)}}{U_{dim}} \quad (4)$$

$$C_{pi(\Delta t_j)} = \frac{P_{di(\Delta t_j)}}{P_{db}} = \frac{I_{di(\Delta t_j)}}{I_{db}},$$

де  $U_{di(\Delta t_j)}$  – середнє значення напруги як функції кутів керування ланки постійного струму перетворювача  $i$ -го механізму в інтервалі  $\Delta t_j$ ;  $U_{dim}$  – максимальне середнє значення напруги ланки постійного струму з урахуванням запасу в межах 10–12%.

Слід зазначити, що відносні косинусний і синусний коефіцієнти Фур'є вихідних струмів  $i$ -х перетворювачів (ПП) механізмів у цьому випадку визначаються згідно спрощених співвідношень при симетричному керуванні ПП:

$$\bar{A}_{(k)i(\Delta t_j)} = K_{i(\Delta t_j)} \cdot \cos k\alpha_{i(\Delta t_j)}; \quad (5)$$

$$\bar{B}_{(k)i(\Delta t_j)} = K_{i(\Delta t_j)} \cdot \sin k\alpha_{i(\Delta t_j)},$$

де  $\alpha_{i(\Delta t_j)}$  – дискретні значення кутів керування  $i$ -ми ПП, які визначаються згідно осцилограм  $n(t)$ .

На підставі (3) – (5) визначаються енергетичні коефіцієнти зсуву  $K_{z\Sigma(\Delta t_j)}$ , спотворення  $K_{s\Sigma(\Delta t_j)}$  і потужності  $K_{p\Sigma(\Delta t_j)}$  групової системи електропривода екскаватора згідно співвідношень:

$$K_{z\Sigma(\Delta t_j)} = \frac{P_{(1)\Sigma(\Delta t_j)}}{\sqrt{P^2_{(1)\Sigma(\Delta t_j)} + Q^2_{(1)\Sigma(\Delta t_j)}}} = \frac{P_{(1)\Sigma(\Delta t_j)}}{S_{(1)\Sigma(\Delta t_j)}};$$

$$K_{s\Sigma(\Delta t_j)} = \frac{S_{(1)\Sigma(\Delta t_j)}}{S_{\Sigma(\Delta t_j)}}; \quad (6)$$

$$K_{p\Sigma(\Delta t_j)} = \frac{P_{(1)\Sigma(\Delta t_j)}}{S_{\Sigma(\Delta t_j)}},$$

де  $S_{(1)\Sigma(\Delta t_j)}$  – потужність першої гармоніки.

Таким чином, на підставі вихідних характеристик навантаження (осцилограм, діаграм) і аналітичних співвідношень (3) – (6) здійснена побудова і практична реалізація алгоритмів автоматизованого розрахунку базових енергетичних характеристик групового електропривода екскаватора з урахуванням нестабільності навантажень основних механізмів за повний цикл роботи  $T_c = \sum_{j=1}^N \Delta t_j = 25c$ .

Окремі результати таких розрахунків наведені нижче за умови використання трифазних реверсивних мостових схем для ПП усіх механізмів, симетричного способу керування  $i$ -ми ПП і 10-ти відсот-

кового запасу по напрузі вторинної обмотки групового трансформатора (згідно з проектними рекомендаціями).

Як засвідчують графіки складових потужностей (рис. 2), протягом всього циклу сумісної роботи механізмів підйому, натиску і повороту рівень реактивної потужності  $Q_{(1)\Sigma}$  в два рази перевищує рівень активної  $P_{(1)\Sigma}$ , що, відповідно, призводить до суттєвого зниження коефіцієнту потужності  $K_{p\Sigma}$  (без урахування спотворення) (рис. 3) при значній його нестабільності. Відповідні залежності першої і вищих (5-ї, 7-ї, 11-ї і 13-ї) гармонік первинного струму групової СЖК приведені на рис. 4. і фізично відображають картину неперервної зміни їх рівнів в умовах нестабільності навантажень групи механізмів.

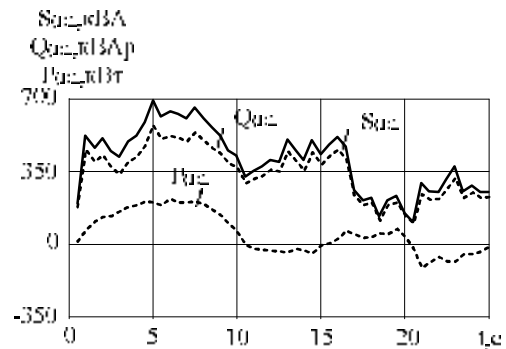


Рисунок 2 - Реактивна  $Q_{(1)\Sigma}$ , активна  $P_{(1)\Sigma}$  та повна  $S_{(1)\Sigma}$  потужності групової СЖК екскаватора ЕКГ-4, 6

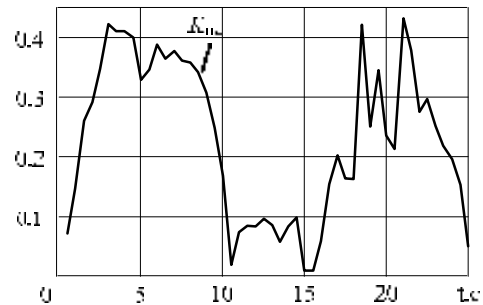


Рисунок 3 - Графік коефіцієнту потужності групової СЖК екскаватора ЕКГ-4, 6

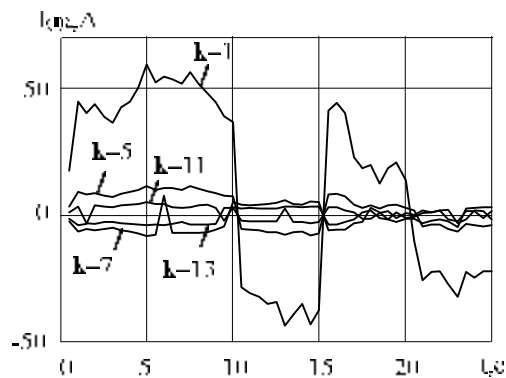


Рисунок 4 - Гармоніки первинного струму групової СЖК екскаватора ЕКГ-4, 6

## Висновки.

1. Запропонований нетрадиційний підхід щодо аналізу і розрахунків складових повної потужності в групових СЖК установками (механізмами) з нестабільними навантаженнями на основі інтегральних співвідношень і спектральної теорії нелінійних кіл, на відміну від відомих методів, забезпечує аналіз, розрахунки та прогнозування складових потужності шляхом використання уніфікованих алгоритмів і без складних проміжних графоаналітичних операцій.

2. Отримані результати розрахунків складових повної потужності засвідчують, що в умовах роботи групи установок (механізмів) з нестабільними і різкозмінними навантаженнями, коли рівні реактивної потужності і гармонік струму неперервно змінюються (враховуючи й динаміку зміни), компенсація неактивних складових також потребує нетрадиційних підходів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Иванов В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

2. Жежеленко И. В. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей / И. В. Жежеленко, Ю. П. Саенко, В. П. Степанов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 128 с.

3. Маевский О. А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей / О. А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

4. Пивняк Г. Г. Метод анализа и расчета систем группового питания и управления / Г. Г. Пивняк, А. Ф. Синолицы // Электричество, 2005. – № 6. – С. 2–8.

Стаття надійшла 15.11.2010 р.  
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
Чорним О.П.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩИХ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКАМИ С НЕСТАБИЛЬНЫМИ НАГРУЗКАМИ

*Синолицы А.Ф., д.т.н., Кольсун В.А., к.т.н., ас., Дуб Е.С., асп.*

*Криворожский технический университет*

*ул. XXII партсъезда, 11, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., 50027, Украина*

*E-mail: Kolsun\_VA@3g.ua*

Приведен анализ энергетических режимов систем питания и управления группы электроприводов с резкопеременными нагрузками с использованием нетрадиционного метода на основе интегральных соотношений и элементов спектральной теории нелинейных цепей. На примере экскаватора ЭКГ-4, 6 показано, как реактивная составляющая мощности почти в 2 раза превосходит активную, что устанавливает исходные предусловия для выбора компенсирующих устройств.

**Ключевые слова:** статические преобразователи, составляющие мощности, гармоники тока, энергетическая эффективность, групповая система питания и управления.

## CHARACTERS OF POWER COMPONENTS FORMING AND CALCULATION IN POWER SUPPLY AND CONTROL SYSTEM OF PLANTS WITH UNSTABLE LOADS

*Sinolitsy A., Doc. Sc. (Tech.), Prof., Kolsun V., Cand. of Sc. (Tech.), ass., Dub E., post-grad.*

*Kryvyi Rig Technical University*

*vul. XXII Partzjizdu, 11, Kryvyi Rig, Dnipropetrovsk reg., 50027, Ukraine*

*E-mail: Kolsun\_VA@3g.ua*

The work considers analysis of power supply energetic modes and control systems of electrical drive groups with transient loads by using the untraditional methods based on integral ratios and elements of nonlinear circuits spectral theory. As an example, it is shown that the reactive power of excavator EKG-4, 6 is two times larger of active power. The last is setting initial conditions for compensation systems choice.

**Key words:** static converters, power components, current harmonics, energy efficiency, group power supply and control system.