

I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.314.632

А. П. Сінолиций, В. А. Кольсун, Д. О. Кальмус, М. В. Жуйков

Комутаційні процеси в системах групового живлення і керування енергоємними установками

Приведені особливості формування комутаційних процесів в системах групового живлення і керування енергоємними установками з урахуванням реальних навантажень. Створена математична модель та побудований, на її основі, алгоритм розрахунку комутаційних спотворень при роботі групи перетворювальних пристроїв на мережу живлення. Наведені приклади розрахунку формування комутаційних режимів групи турбомеханізмів та механізмів прокатного стану ДС – 250/150 – 6 ВАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ».

Потужність нелінійних навантажень, які складаються, в основному, із перетворювальних пристроїв, у цехових мережах сучасного енергоємного виробництва України вже сьогодні становить близько 80 % загальної встановленої потужності, коефіцієнт нелінійних спотворень кривої напруги в мережах 0,38 кВ цих цехів може досягати 10–15 %, а в мережах 6, 10 кВ – до 5%. Відомі дослідження і розробки цього напрямку базуються на точних і наближених методах аналізу і розрахунку [1–3], а для групових установок при визначенні коефіцієнта несинусоїдності K_{HCS} рекомендовані спрощені вирази [2] або методи вірогідності на основі статистичних даних [4]. Характерні особливості комутаційних процесів одиночної тиристорної установки неодноразово розглянуті в [2, 3, 5]. Для групових установок при визначенні коефіцієнту несинусоїдності K_{HCS} рекомендовані спрощені вирази [2] або ймовірнісні методи на основі статистичних даних [4].

Найбільш загальним при будь-якій структурі є критерій оцінки комутаційних спотворень напруги мережі живлення, який визначається через коефіцієнт несинусоїдності [6]:

$$K_{HCS} = \frac{1}{U_{(1)M}} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T U_{(k)\Sigma}^2(t) dt}, \quad (1)$$

де $U_{(1)M}$ – діюче значення напруги основної частоти мережі живлення (інколи приймається номінальна напруга мережі U_H); $U_{(k)\Sigma}(t)$ – миттєве значення напруги k -ї гармоніки, викликані комутаційними спотвореннями групи перетворювальних пристроїв.

Принципово можливі два підходи до оцінки комутаційних спотворень напруги мережі живлення. Перший базується на розкладанні в ряд Фур'є спотвореної кривої фазної (лінійної) напруги [2, 3], другий – на використанні теорії змінних струму, виходячи з відомих гармонік струмів (їх аналітичних виразів) та відпо-

відних еквівалентних схем та параметрів.

При роботі групи тиристорних пристроїв на мережу виникає кілька характерних режимів, які обумовлені взаємним впливом комутаційних процесів перетворювачів через загальну для них індуктивність мережі. Перший режим характеризується суттєвим розбігом їх кутів керування і комутації не співпадають у часі. В такому випадку розрахунки електромагнітних процесів взаємовпливу можна звести до розрахунків одиночних установок (особливо це стосується для методик основаних на гармонічному аналізі). У разі збігу комутаційних процесів різних перетворювачів у часі, розрахунки суттєво відрізняються. В останньому випадку можуть виникати навіть аварійні режими перетворювачів завдяки неприпустимому збільшенню тривалості комутації. Аналіз комутаційних процесів особливо необхідно проводити для групи електроприводів, для яких відомо, що різниця між кутами керування невелика, а струм навантаження досягає досить суттєвих значень (вказаний випадок характерний для прокатного виробництва).

Однак, дотепер аналіз даних електромагнітних процесів у вітчизняній і закордонній науково-технічній літературі розглянутий недостатньо, незважаючи на гостру потребу практики.

Метою статті є аналіз комутаційних процесів у системах групового харчування й керування енергоємних установок з урахуванням реальних навантажень, розробка алгоритму розрахунку цих процесів і їхнього дослідження на прикладі турбомеханізмів і механізмів прокатного стану.

Схема заміщення електроенергетичної мережі з груповими перетворюючими пристроями при паралельному живленні від загальної мережі N перетворюючих пристроїв приведена на рис. 1.

Система диференціальних рівнянь, яка описує процеси у вказаній вище груповій системі електроприводу в комутаційні моменти, набуває вигляду:

© А. П. Сінолиций, В. А. Кольсун, Д. О. Кальмус, М. В. Жуйков 2009 р.

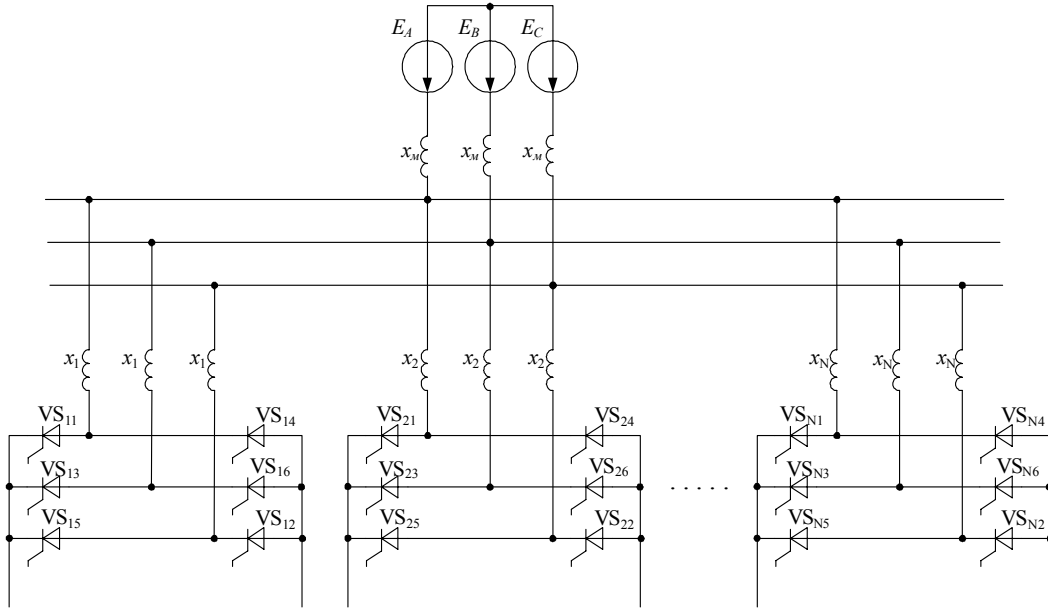


Рис. 1. Схема заміщення мережі живлення групи перетворюючих пристроїв

$$\left. \begin{aligned}
 2L_m \frac{di}{dt} + 2L_1 \frac{di_1}{dt} &= E_A - E_B; \\
 2L_m \frac{di}{dt} + 2L_2 \frac{di_2}{dt} &= E_A - E_B; \\
 &\dots; \\
 2L_m \frac{di}{dt} + 2L_j \frac{di_j}{dt} &= E_A - E_B; \\
 &\dots; \\
 2L_m \frac{di}{dt} + 2L_n \frac{di_n}{dt} &= E_A - E_B; \\
 i_1 + i_2 + \dots + i_j + \dots + i_n &= i_m.
 \end{aligned} \right\} (2)$$

де $E_A = E_m \sin(\omega t)$, $E_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ – напруги мережі фаз A та B відповідно; i_m – струм мережі, $i_1, i_2, \dots, i_j, \dots, i_n$ – струми відповідного перетворювача, i є функціями часу; L_m – еквівалентна індуктивність мережі, $L_1, L_2, \dots, L_j, \dots, L_n$ – індуктивності розсіювання трансформаторів перетворювачів.

Розв'язком системи (2) буде вираз:

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{E_B - E_A}{2L_m(a'_j - 1) \left(1 + \sum_{k=1}^n \frac{1}{a'_k - 1} \right)}, \quad (3)$$

де $a'_j = (L_j + L_m) / L_m$.

Розв'язавши рівняння (3) для фази A , враховуючи значення коефіцієнта a'_j (який знаходиться через індуктивний опір $x_j = \omega L_j$, $x_m = \omega L_m$ або через провідність $g_j = 1/x_j$, $g_m = 1/x_m$):

$$i_j = Id_0 - \frac{\sqrt{6}U_m g_j g_m}{2(g_m + g_\Sigma)} \times (\cos(\omega t \mp \pi/6) \mp \cos(\alpha_j)), \quad (4)$$

де знак «-» береться при включенні, а знак «+» – при виключенні вентиля визначеної фази; α_j – кут керування j -м перетворювачем; Id_0 – початкове значення струму перетворювача для кожного періоду дослідження комутаційного перетворювача.

Нижче на рис. 2 представлений алгоритм для розрахунку кутів включення та виключення вентилів перетворювачів (ωt), значень струму (It), відносного провалу фазної (лінійної) напруги (a) для кожного періоду комутаційного процесу. В цьому алгоритмі ωt , a – вектори стовпці розмірністю $2N$; It , gt – матриці розмірністю $2N \times N$. Величина s в алгоритмі змінюється від 1 до N . Параметри перетворювачів слід вводити у порядку збільшення їх кута включення. В блоці 17 значення струму розраховується за формулою (4) зі знаком «-».

За допомогою алгоритму (рис. 2) прораховуються усі можливі варіанти комутацій (враховуючи збіг комутацій різних перетворювачів) для будь-якої кількості перетворювачів, підключених до мережі, яка підлягає дослідженню.

Використовуючи дані алгоритму (рис. 2), можна розрахувати гармоніки струму кожного (j -го) перетворювача:

$$A_I(k, j) = \sum_{\tau=1}^{2N-1} A'_{(k)Ij} \left(\begin{array}{c} \omega t_\tau - \pi/6, \omega t_{\tau+1} - \omega t_\tau, \\ It_{\tau+1,j} - It_{\tau,j}, gt_{\tau,j}, \\ \sum_{s=1}^N gt_{\tau,s} \end{array} \right), \quad (5)$$

$$B_I(k, j) = \sum_{\tau=1}^{2N-1} B_{(k)Ij} \left(\begin{matrix} \omega t_{\tau} - \pi/6, \omega t_{\tau+1} - \omega t_{\tau}, \\ iI_{\tau+1,j} - I_{\tau,j}, g_{\tau,j}, \\ \sum_{s=1}^N g_{\tau,s} \end{matrix} \right); \quad (6)$$

де k – номер гармоніки;

$$\begin{aligned} A'_{(k)Ij}(\alpha, \gamma, Id, g_j, g_{\Sigma}) &= \frac{1}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}k\right) \times \\ &\times (1 - \cos(\pi k)) \left\{ \frac{\sqrt{3} \cdot U_m \cdot g_m \cdot g_j}{g_m + g_{\Sigma}} \times \right. \\ &\times \left[\frac{\sin\left[(k+1)\frac{\gamma_i}{2}\right] \cdot \sin\left[(k+1) \cdot \left(\alpha_i + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right]}{k+1} - \right. \\ &\left. \left. \frac{\sin\left[(k-1)\frac{\gamma_i}{2}\right] \cdot \sin\left[(k-1) \cdot \left(\alpha_i + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right]}{k-1} \right] \right\} - \\ &- \frac{2}{k} \left[\frac{\sqrt{3} \cdot U_m \cdot g_m \cdot g_j}{g_m + g_{\Sigma}} \cdot \cos(\alpha_i) \times \right. \\ &\times \sin\left(k \frac{\gamma_i}{2}\right) \cdot \cos\left(k \cdot \left(\alpha_i + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right) - \\ &\left. - I_{di} \cdot \sin\left(k \cdot \left(\alpha_i + \gamma_i + \frac{\pi}{2}\right)\right) \right]; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B'_{(k)Ij}(\alpha, \gamma, Id, g_j, g_{\Sigma}) &= \frac{1}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}k\right) \times \\ &\times (1 - \cos(\pi k)) \times \left\{ \frac{\sqrt{3} \cdot U_m \cdot g_m \cdot g_j}{g_m + g_{\Sigma}} \times \right. \\ &\times \left[\frac{\sin\left[(k+1)\frac{\gamma_i}{2}\right] \cdot \cos\left[(k+1) \cdot \left(\alpha_i + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right]}{k+1} + \right. \\ &\left. \left. \frac{\sin\left[(k-1)\frac{\gamma_i}{2}\right] \cdot \cos\left[(k-1) \cdot \left(\alpha_i + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right]}{k-1} \right] \right\} + \end{aligned}$$

$$\left. \left. \left. \left. \frac{\sqrt{3} \cdot U_m \cdot g_m \cdot g_j}{g_m + g_{\Sigma}} \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \sin\left(k \frac{\gamma_i}{2}\right) \times \right. \right. \right. \right. \left. \left. \left. \left. \times \sin\left(k \cdot \left(\alpha_i + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right) - \right. \right. \right. \right. \left. \left. \left. \left. - I_{di} \cdot \cos\left(k \cdot \left(\alpha_i + \gamma_i + \frac{\pi}{2}\right)\right) \right. \right. \right. \right. \left. \right. \right. \left. \right. \right. \quad (8)$$

Коефіцієнти Фур'є струму мережі представляють собою суму відповідних коефіцієнтів кожного перетворювача:

$$\left. \begin{aligned} A_{I\Sigma}(k) &= \sum_{j=1}^N A_I(k, j) \\ B_{I\Sigma}(k) &= \sum_{j=1}^N B_I(k, j) \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

де $A_I(k, j)$, $B_I(k, j)$ визначаються за (5) та (6).

Гармоніки напруги спотворення визначаються наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} A_{\Delta U}(k) &= \sum_{\tau=1}^{2N-1} A'_{(k)\Delta U}(a_{\tau}, \omega t_{\tau} - \pi/6, \omega t_{\tau+1} - \omega t_{\tau}); \\ B_{\Delta U}(k) &= \sum_{\tau=1}^{2N-1} B'_{(k)\Delta U}(a_{\tau}, \omega t_{\tau} - \pi/6, \omega t_{\tau+1} - \omega t_{\tau}) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

де

$$\begin{aligned} A'_{(k)\Delta U}(a_{\tau}, \omega t_{\tau} - \pi/6, \omega t_{\tau+1} - \omega t_{\tau}) &= \\ &= \frac{a_{\tau} \cdot \sqrt{3} \cdot U_m}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3}k\right) \cdot (1 - \cos(\pi k)) \times \\ &\times \left\{ \frac{\sin\left[(k+1)\frac{\gamma_i}{2}\right] \cdot \sin\left[(k+1) \cdot \left(\alpha_i + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right]}{k+1} + \right. \\ &\left. \left. \frac{\sin\left[(k-1)\frac{\gamma_i}{2}\right] \cdot \sin\left[(k-1) \cdot \left(\alpha_i + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right]}{k-1} \right\}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} B'_{(k)\Delta U}(a_{\tau}, \omega t_{\tau} - \pi/6, \omega t_{\tau+1} - \omega t_{\tau}) &= \\ &= \frac{a_{\tau} \cdot \sqrt{3} \cdot U_m}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3}k\right) \cdot (1 - \cos(\pi k)) \times \end{aligned}$$

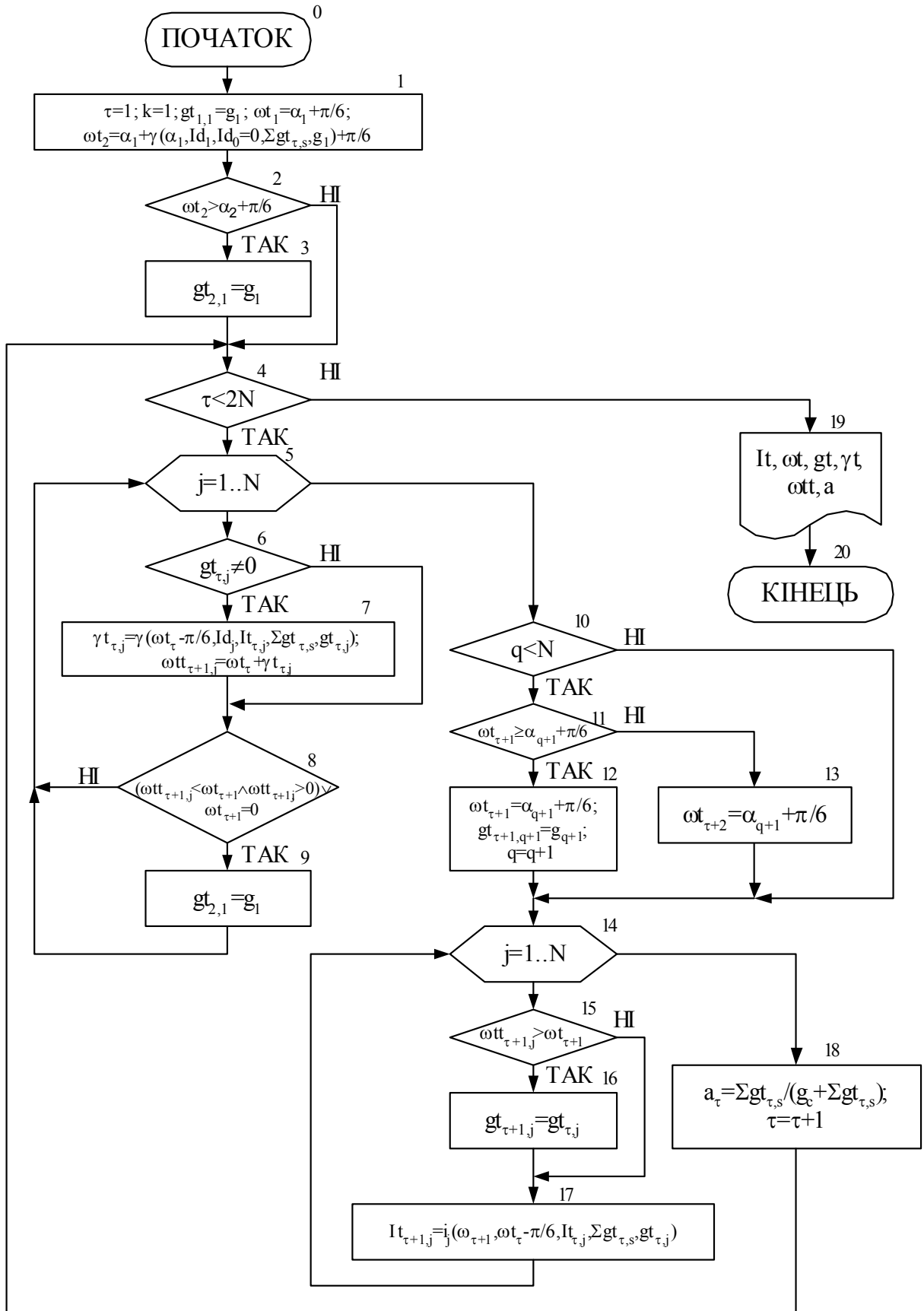


Рис. 2. Алгоритм розрахунку комутаційного процесу групового електроприводу

$$\left. \begin{aligned} & \times \left\{ \frac{\sin \left[(k+1) \frac{\gamma_i}{2} \right] \cdot \cos \left[(k+1) \cdot \left(\alpha_i + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \right]}{k+1} + \right. \\ & \left. + \frac{\sin \left[(k-1) \frac{\gamma_i}{2} \right] \cdot \cos \left[(k-1) \cdot \left(\alpha_i + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \right]}{k-1} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Коефіцієнти Фур'є напруги спотворення можна визначити за методикою

$$\left. \begin{aligned} A_{\Delta U}(k) &= x_c \cdot k \cdot B_{\Sigma}(k) \\ B_{\Delta U}(k) &= -x_c \cdot k \cdot A_{\Sigma}(k) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Створена математична модель дозволяє прораховувати комутаційні процеси для будь-якої кількості пе-

ретворювальних пристроїв, які працюють на мережу живлення, з урахуванням характеру їх навантаження. Так, зважаючи на особливості навантаження турбомеханізмів, були прораховані випадки комутаційних процесів та відповідних енергетичних показників (за допомогою викладеної вище методики) для трьох регульованих приводів, які зображені на рис. 3.

Дослідження режимів взаємовпливу в СГЖК механізмами з циклічно-нестабільними навантаженнями проводилися на прикладі прокатного стану ДС – 250/150 – 6 ВАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» по реальним вихідними даним (табл. 1).

Запропоновані розрахунки базувалися на обчисленні напруги спотворення мережі (рис. 4), викликані комутаційними процесами, які відбуваються у групі перетворювачів, працюючих на одну мережу. Саме напруга спотворення розкладалася у ряд Фур'є (рис. 5) і знаходилося її діюче значення у відсотках (рис. 6). На рис. 5 та рис. 6 показані варіанти розрахунків для профілю прокатки 6,5 мм.

В розглянутому випадку використання саме напруги спотворення у відносних одиницях більш доцільне, ніж використання коефіцієнту несинусоїдності:

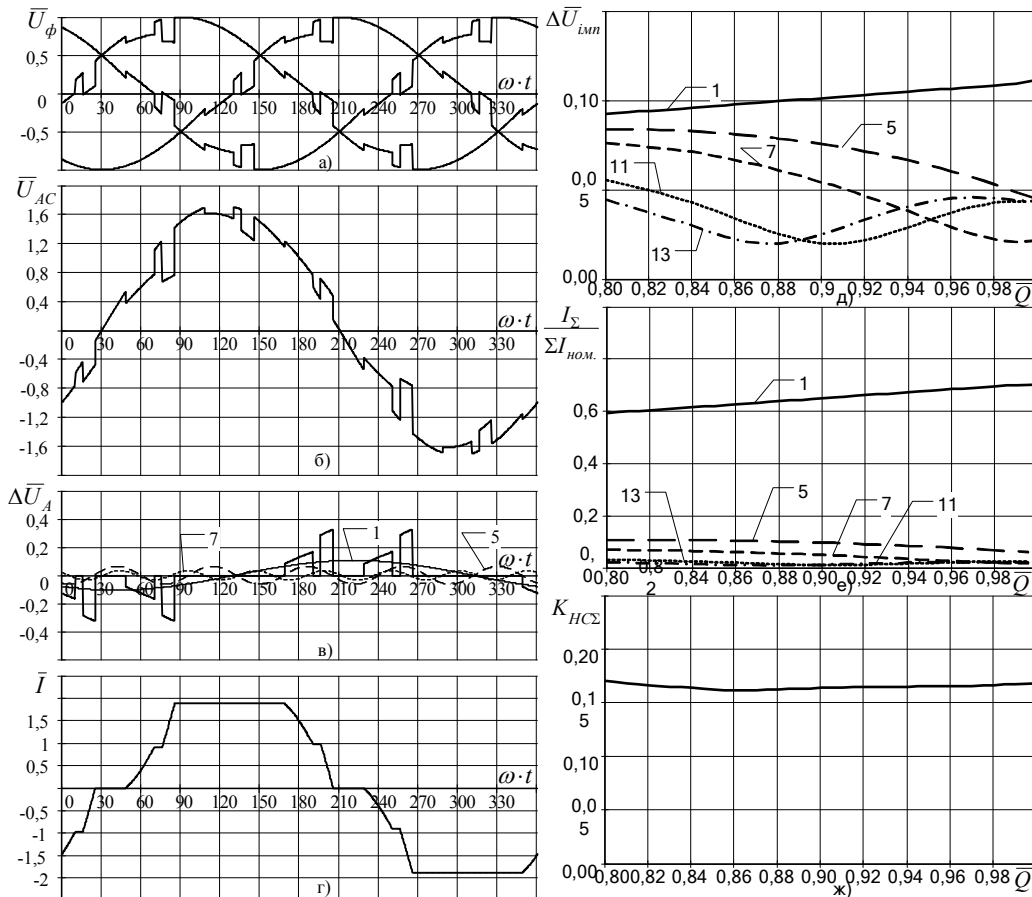


Рис. 3. Криві напруги (а), (б), комутаційних викривлень (в) та фазного струму (г) при продуктивностях механізмів $\bar{Q}_1 = 0,7$, $\bar{Q}_2 = 0,7$, $\bar{Q}_3 = 0,95$ і залежності гармонік комутаційних викривлень напруги (д), первинного струму (е) та коефіцієнту несинусоїдності (ж) для $\bar{Q}_1 = 0,7$, $\bar{Q}_2 = 0,7$, $\bar{Q}_3 = \text{var}$

Таблиця 1. Вихідні дані ПП електроприводів прокатних клітей прокатного стану МС – 250/150 – 6 для профілю прокату 6,5 мм

№ кліті	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U_d, В$	250	250	260	250	250	210	240	250	200	200	250	300	390	390	400	400	400	480	450	500
$I_d, А$	270	250	250	400	650	600	600	750	1100	800	1000	400	500	550	900	1100	800	600	400	500
$\alpha, \text{эл.гр.}$	70	70	69	70	70	73	71	70	74	74	70	66	58	58	57	57	57	50	53	48

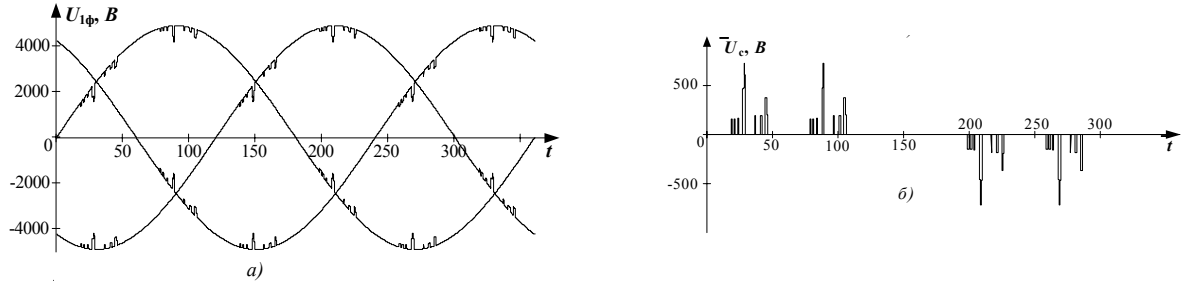


Рис. 4. Напряга мережі живлення (а) прокатного стану та напряга спотворення (б)

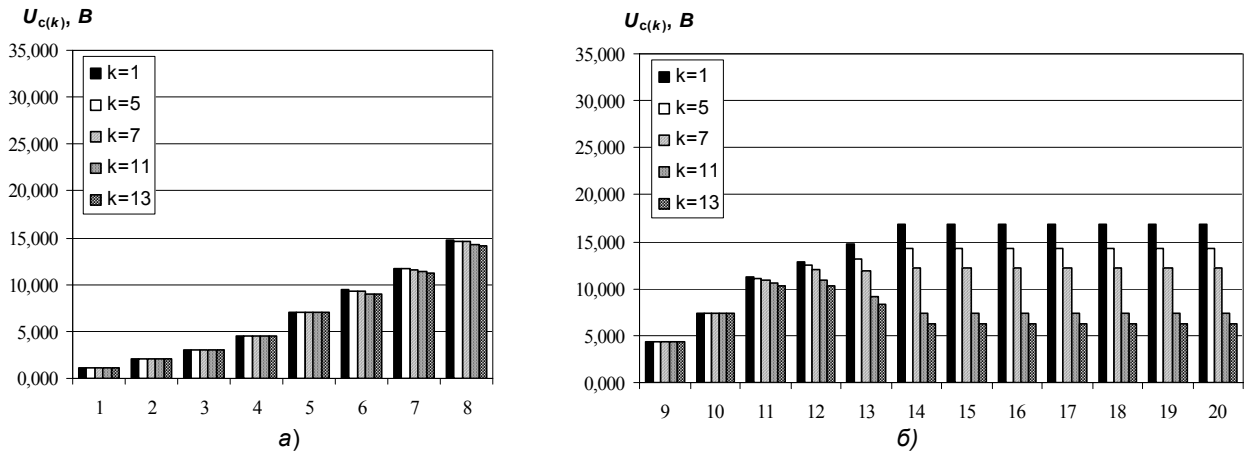


Рис. 5. Рівні гармонік напруги спотворення секцій №2 (а) і №3 (б) підстанції КР3-12

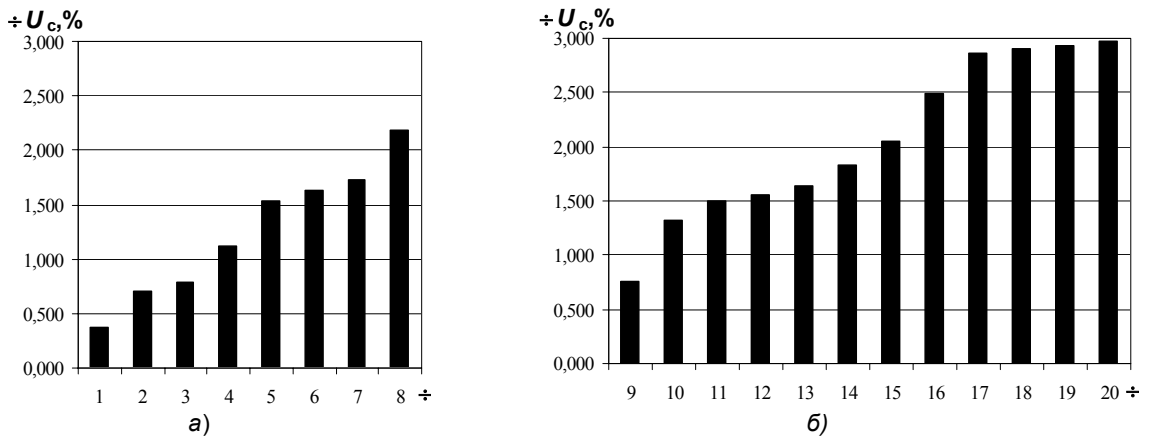


Рис. 6. Рівні напруги спотворення секцій №2 (а) і №3 (б) підстанції КР3-12

$$K_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_{(k)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^p U_{(k)}^2}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (14)$$

де $U_{(k)}$ – діюче значення напруги k -ї гармоніки; p – номер останньої із врахованих гармонік.

Це викликано тим, що у напрягу спотворення входить перша гармоніка, яка сумірна з вищими (рис. 5) і вносить спотворення у напрягу мережі живлення. Отже, використання напруги спотворення DU_c для аналізу впливу комутаційних процесів на мережу живлення більш доцільне, аніж коефіцієнту несинусоїдності $K_{нс}$.

Висновки

1. Обґрунтовано метод математичного моделювання комутаційних процесів в ГСЖК, який враховує як незалежність так і збіг у часі комутацій N - перетворювальних пристроїв і дозволяє використанням запропонованих уніфікованих алгоритмів здійснити оцінку якісних і кількісних характеристик електромагнітного (комутаційного) впливу при значному розкиді кутів керування і навантаження i -х установок (механізмів).

2. Запропонований критерій оцінки взаємовпливу в СГЖК механізмами з циклічно-нестабільними навантаженнями у вигляді відносної напруги спотворення на відміну від загальноприйнятого коефіцієнта несинусоїдності надав можливість отримати більш повну інформацію про механізм формування рівнів гармонік напруги спотворення в окремих ділянках мережі живлення неперервного прокатного стану для різних профілей прокату.

Перелік посилань

1. Высочанский В. С. Искажение формы напряжения сети при коммутации тока в мостовых выпрямителях / В. С. Высочанский. // Электричество. – 1973. –

№4. – С. 15–21.

2. Иванов В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
3. Шипилло В. П. Влияние тиристорного электропривода на питающую сеть / В. П. Шипилло // Электротехническая промышленность. Электропривод. – 1970. – №1. – С. 5–10.
4. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
5. Справочник по преобразовательной технике / под ред. И. М. Чиженко. – К. : Техніка, 1978. – 447 с.
6. Пивняк Г. Г. Коммутационные процессы в электроэнергетических сетях с групповыми преобразовательными устройствами / Г. Г. Пивняк, А. Ф. Синолицы // Науковий Вісник НГА України. – 1999. – №6. – С. 110–113.

Поступила в редакцию 02.12.08 г.

Приведены особенности формирования коммутационных процессов в системах группового питания и управления энергоемкими установками с учетом реальных нагрузок. Разработана математическая модель и построенный на ее основе алгоритм расчета коммутационных искажений при работе группы преобразовательных устройств на сеть. Приведены примеры расчета формирования коммутационных режимов группы турбомеханизмов и механизмов прокатного стана ДС-250/150-6 ВАТ «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ»

The peculiarities of commutative processes creation in systems of group power supply and control of power-intensive installations subject to real loads are presented. The mathematical model and the algorithm of commutative distortions calculation constructed on its basis is developed at operation of converter installation group on a power line. The commutative calculations of turbomechanisms group and rolling mill mechanisms of «ArselorMittal Krivoy Rog» are given in the paper.

УДК 621.313.222:62-83

П. Д. Андриенко, С. И. Шило, А. О. Каплиенко, И. Ю. Немудрый

Исследование переходных режимов при последовательном соединении серийных электродвигателей постоянного тока

Предложена и исследована эффективная антибоксовочная система для подвижного состава железных дорог с тяговыми электродвигателями постоянного тока. В статье разработана модель для исследования переходных режимов работы электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения при их последовательном соединении. Приведены результаты моделирования электромеханических процессов, происходящих при боксовании колесных пар подвижного состава железных дорог.

Обеспечение надежности работы электроподвижного состава в эксплуатации требует принятия мер по устранению такого негативного режима, как боксование. Боксование – это явление проскальзывания колеса железнодорожного транспорта, которое возникает при

превышении тяговой силы, приложенной к колесу, силы сцепления колеса с рельсом. Данный режим очень опасен, так как при его возникновении появляются ползуны и мартенсит в зонах теплового воздействия, что приводит к повышенному износу и значительному

© П. Д. Андриенко, С. И. Шило, А. О. Каплиенко, И. Ю. Немудрый 2009 г.