

Таблиця 3. Результати розрахунку

Номера ветвей	Значення токов ветвей * 10 ²	Значення напряжень ветвей * 10 ⁴
1	-0,2015-4,4433i	1,5779-1,4089i
2	-0,2015-4,4433i	-1,0975+1,2780i
3	-0,2015-4,4433i	-0,4803+0,1309i
4	-2,2909+7,7596i	6,3500
5	-2,2909+7,7596i	-4,7721-1,4089i
6	2,4924-3,3163i	1,5779-1,4089i
7	-1,8205-1,5634i	1,0975-1,2780i
8	-1,6190-2,8799i	1,0975-1,2780i
9	-1,0741-4,0074i	-0,0005-0,0020i
10	-1,0741-4,0074i	0,4809-0,1289i
11	-0,8726+0,4359i	-0,4799+0,1307i
12	-0,8726+0,4359i	-0,0004+0,0002i

Висновки

Універсальна комп'ютерна програма, розроблена згідно з запропонованою методикою, дозволяє виконувати розрахунок установившихся режимів електричних кіл синусоїдального струму, що містять взаємодіючі гілки, що зазвичай неможливо виконати з допомогою популярних систем Simulink і PSpice.

Перелік посилань

1. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушилл А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
2. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники т. 1.: Энергоиздат, 1981. – 522 с.
3. Тиховод С. М., Корнус Т. М., Паук Ю. И., Тарчуткин А. Л. Разработка алгоритма и программы расчета переходных процессов в нелинейных электрических цепях // Электротехника та електроенергетика – 2003. – № 1. – С. 35–42.
4. Чуа Л.О., Пен – Мин – Лин. Машинный анализ электронных схем. М.: Энергия, 1980. – 640 с.

Поступила в редакцию 06.11.07 г.

После доработки 13.11.07 г.

Запропоновано методику й розроблена універсальна комп'ютерна програма для розрахунку сталих процесів у складних електричних ланцюгах синусоїдального струму, що містять джерела ЕДС і струму, керовані напругами й струмами довільних галузей.

The technique is offered and the universal computer program for calculation of the established processes in the complex electric circuits of a sine wave current containing EMF sources and current, controlled by voltage and currents of any branches is developed.

УДК 621.314.632

А. П. Сінолиций, В. А. Кольсун, М. В. Жуйков

Енергетичні характеристики тиристорних електроприводів постійного струму у динамічному режимі їх роботи

Розглянута робота тиристорних перетворювачів постійного струму в динамічних режимах електроприводів ножиць неперервного прокатного стану ДС-250/150-6 та блюміну ВАР АРСЕЛОР МІТТАЛ. Проведений гармонічний аналіз струму, розраховані складові потужності та несиметрія навантаження трансформаторів перетворювачів вказаних установок у відповідних режимах.

В зв'язку з енергетичною кризою, яка набула чинності у останні роки, актуальним та втрибованим практикою є аналіз енергетичних характеристик автоматизованих електроприводів постійного струму, результати якого дають можливість отримати критерії для їх покращення.

Застосування регульованого електроприводу постійного струму для енергоємних установок з нестабільними навантаженнями (прокатні кліти, ножиці,

підіймально-транспортні засоби і т. п.), силові ланки якого містять керовані випрямлячі різної фазності, призводить до появи специфічних умов формування енергобалансу. На відміну від сталих режимів перетворювальних пристроїв (ПП), коли складові потужності і гармоніки струму в енергетичних колах визначаються досить легко [1, 2], для несталіх режимів використання відомих підходів і особливо їх математичного забезпечення неможливе.

Відомі дослідження [3, 4] містять загальний теоретичний аналіз та розрахункові співвідношення без визначення їх практичного використання, особливо в частині появи та рівня неканонічних гармонік та нестабільності складових потужності. Зазначене призводить до ускладнень режимів роботи фільтрокомпенсуючих пристроїв, вибору їх оптимальних параметрів і позитивного вирішення проблеми електромагнітної сумісності.

Запропонована стаття присвячена аналізу енергетичних характеристик тиристорних електроприводів постійного струму у динамічному режимі їх роботи.

Аналіз несталих процесів перетворювача обумовлює врахування як зміни струму в колі постійного струму, так і зміни його кута керування. Якщо струм в колі постійного струму змінюється досить повільно (розглядається робота мостового перетворювача) у порівнянні зі зміною кута керування, то струм у фазі можна апроксимувати прямокутною формою імпульсу (рис. 1). Лінійний характер зміни кута керування призведе до того, що частота основної гармоніки струму буде збільшуватися (зменшуватися), а рівні гармонічних складових струму залишаться такими ж, як і для сталого режиму перетворювача. Та дослідження основних енергетичних характеристик перетворювача з таких позицій не досить зручні, оскільки значно ускладнюються вирази складових потужностей перетворювача. Так, наприклад, активна потужність для синусоїдних напруги та струму однієї фази з різними частотами матиме вигляд

$$P_{A(1)}(t) = \frac{1}{T/2} \int_{t-T/4}^{t+T/4} u(t)i(t)dt = \frac{1}{T/2} \int_{t-T/4}^{t+T/4} U_m \sin(\omega t) I_m \sin((\omega + \Delta\omega)t - \varphi_i) dt = \frac{U_m I_m}{T/2} \left[\frac{\sin(\Delta\omega T/4) \cos(\Delta\omega t - \varphi_i)}{\Delta\omega} - \frac{\sin((2\omega + \Delta\omega)T/4) \cos((2\omega + \Delta\omega)t - \varphi_i)}{2\omega + \Delta\omega} \right], (1)$$

де $\Delta\omega$ – різниця частот напруги та струму; U_m и I_m – амплітудне значення напруги та струму, відповідно; φ_i – кут зсуву фазних напруг та струму.

Для сталого режиму справедливо спрощене співвідношення [1]:

$$P = UI \cos(\varphi). (2)$$

Якщо прийняти, що кут зсуву φ дорівнює куту керування α , який, в свою чергу, визначається як

$$\alpha(t) = \pi/2 - t \cdot \Delta\alpha/2\pi, (3)$$

де $\Delta\alpha$ – зміна кута керування за період 2π , та підставивши (3) в (2), будемо мати

$$P_{A(1)}(t) = UI \cos(\pi/2 - t \cdot \Delta\alpha/2\pi). (4)$$

Побудувавши графіки зміни потужності (рис. 2, а) розрахованих за (1) та (4) видно, що похибка складає менше 1 % (рис. 2, б).

Отже, враховуючи незначну похибку результатів, які отримуються при використанні (4), та простий вираз (4) у порівнянні з (1), можна сказати про доцільність використання (4) для розрахунку активної потужності в перехідних режимах, а також приймати рівні гармонічних складових струму як для сталого режиму роботи перетворювача. При цьому частота основної гармоніки струму визначається

$$\omega_i = \omega_u + \Delta\omega = \omega_u + \omega_u \cdot \Delta\alpha/2\pi = \omega_u (1 + \Delta\alpha/2\pi), (5)$$

де ω_u – частота напруги.

По-іншому слід розглядати процеси в тиристорному перетворювачі постійного струму при одночасній зміні кута керування та струму, виходячи з реальних діаграм (осцилограм) навантаження, наприклад, при реверсивній роботі ножиць неперервного прокатного стану ДС-250/150-6 АРСЕЛОР МІТТАЛ (рис. 3). На представленому рисунку використовуються наступні позначення: U_3 – задана напруга; n – швидкість; I_d – вихідний струм перетворювача.

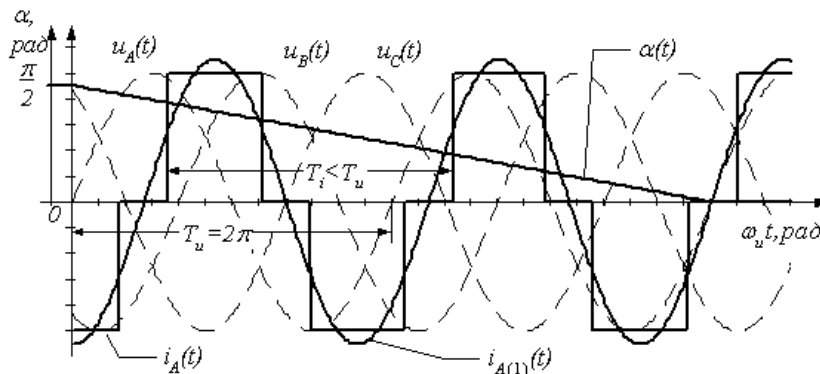
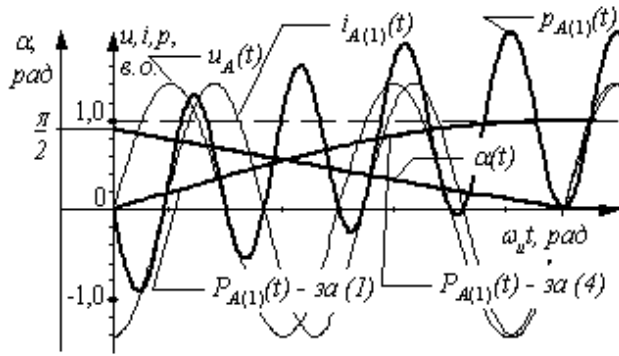
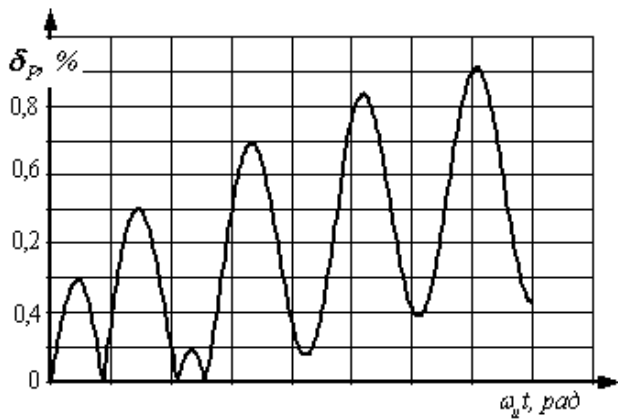


Рис. 1. Діаграми струму та напруги в несталих режимах перетворювача



а)



б)

Рис. 2. Графіки зміни потужності (а) та відносна похибка розрахунків (б)

В розгорнутому вигляді зміни кута керування та струму за час $t_{розр}$. ($\omega t_{розр} = 0,75 \cdot 2\pi$) наведені на рис. 4, де I_ϕ – фазний струм тиристорного перетворювача.

Виходячи з рис. 4, впливає, що в розрахунковому періоді відбуваються значні зміни, як струму, так і кута керування перетворювачем. Вище було доведено доцільність використання спрощеного розрахунку

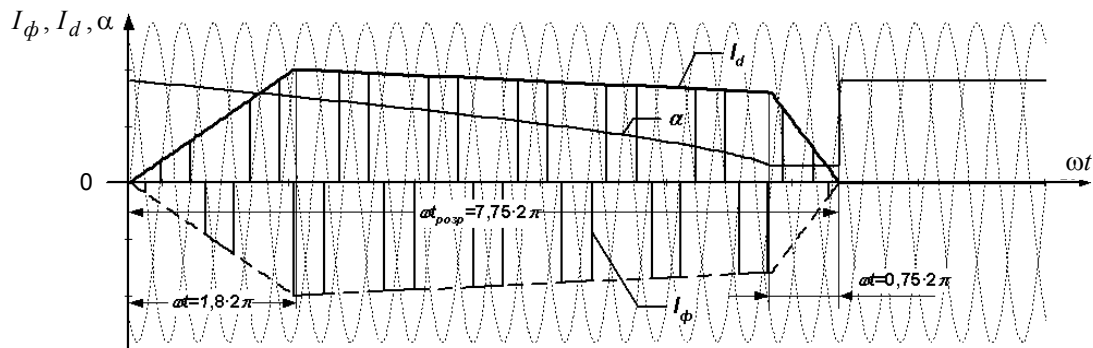


Рис. 4. Спрощена розрахункова діаграма струму за період $t_{розр}$.

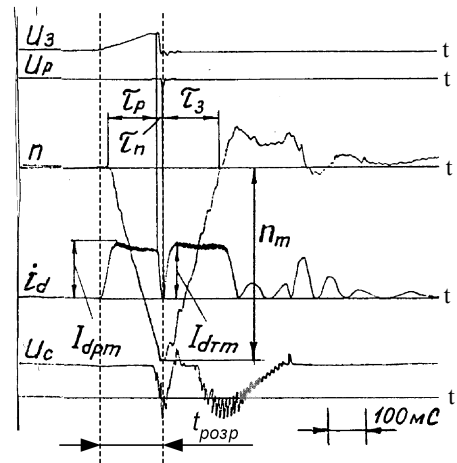


Рис. 3. Осцилограми роботи ножиць неперервного прокатного стану ДС-250/150-6 АРСЕЛОР МІТТАЛ

зміни активної потужності (2). Очевидно, що розрахунки реактивної та повної потужностей за першою гармонікою можна теж спростити до аналогічних виразів [1]:

$$\left. \begin{aligned} P &= U_d I_d(t); \\ Q_{(1)} &= U_d I_d(t) \operatorname{tg} \alpha(t); \\ S_{(1)} &= \frac{U_d I_d(t)}{\cos \alpha(t)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Зміни складових потужностей, розрахованих за (6), наведені на рис. 5 (при використанні системи відносних одиниць, в якій за базисне значення прийнята повна потужність $S_{(1)}$).

Визначення для цього випадку k -х гармонік здійснюється з використанням дискретного гармонічного аналізу неперіодичних функцій [5] за виразами:

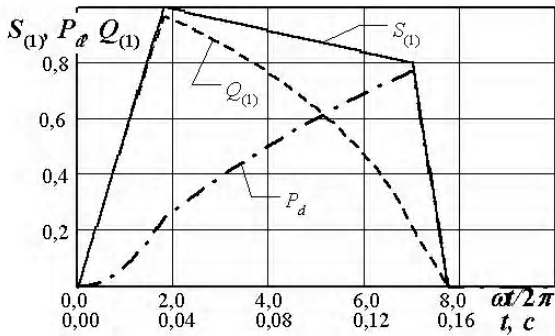


Рис. 5. Зміни складових потужностей для ножиць неперервного прокатного стану ДС-250/150-6 АРСЕЛОР МІТТАП

$$A_{(k)} = \frac{1}{\pi} \begin{bmatrix} \frac{I_{d0}}{k} \cdot A_{11} + \frac{\delta I}{k^2} (A_{12} + A_{13} - \\ - A_{14} - A_{15} + A_{16} + A_{17}) \end{bmatrix};$$

$$B_{(k)} = \frac{1}{\pi} \begin{bmatrix} \frac{I_{d0}}{k} \cdot B_{11} + \frac{\delta I}{k^2} (B_{12} - B_{13} - \\ - B_{14} - B_{15} + B_{16} - B_{17}) \end{bmatrix};$$

$$A_0 = \frac{1}{\pi} \left[I_{d0} \cdot C_{11} + \frac{\delta I}{2} (C_{12} + \frac{\pi}{3} C_{13} - \frac{4}{3} \pi^2) \right]$$

$$A_{11} = \sin k(5\pi/6 + \alpha_{12}) - \sin k(\pi/6 + \alpha_{11}) - \\ - \sin k(11\pi/6 + \alpha_{22}) + \sin k(7\pi/6 + \alpha_{21});$$

$$A_{12} = \cos k(5\pi/6 + \alpha_{12});$$

$$A_{13} = k \left(\frac{5\pi}{6} + \alpha_{12} \right) \sin k \left(\frac{5\pi}{6} + \alpha_{12} \right);$$

$$A_{14} = \cos k(\pi/6 + \alpha_{11}) + k \left(\frac{\pi}{6} + \alpha_{11} \right) \sin k \left(\frac{\pi}{6} + \alpha_{11} \right);$$

$$A_{15} = \cos k(11\pi/6 + \alpha_{22}) + \\ + k \left(\frac{11\pi}{6} + \alpha_{22} \right) \sin k \left(\frac{11\pi}{6} + \alpha_{22} \right);$$

$$A_{16} = \cos k(7\pi/6 + \alpha_{21});$$

$$A_{17} = k(7\pi/6 + \alpha_{21}) \sin k(7\pi/6 + \alpha_{21});$$

$$B_{11} = -\cos k(5\pi/6 + \alpha_{12}) + \cos k(\pi/6 + \alpha_{11}) + \\ + \cos k(11\pi/6 + \alpha_{22}) - \cos k(7\pi/6 + \alpha_{21});$$

$$B_{12} = \sin k(5\pi/6 + \alpha_{12});$$

$$B_{13} = k \left(\frac{5\pi}{6} + \alpha_{12} \right) \cos k \left(\frac{5\pi}{6} + \alpha_{12} \right);$$

$$B_{14} = \sin k(\pi/6 + \alpha_{11}) - \\ - k \left(\frac{\pi}{6} + \alpha_{11} \right) \cos k \left(\frac{\pi}{6} + \alpha_{11} \right);$$

$$B_{15} = \sin k(11\pi/6 + \alpha_{22}) - \\ - k \left(\frac{11\pi}{6} + \alpha_{22} \right) \cos k \left(\frac{11\pi}{6} + \alpha_{22} \right);$$

$$B_{16} = \sin k(7\pi/6 + \alpha_{21});$$

$$B_{17} = k(7\pi/6 + \alpha_{21}) \cos k(7\pi/6 + \alpha_{21});$$

$$C_{11} = [(\alpha_{12} - \alpha_{11}) - (\alpha_{22} - \alpha_{21})];$$

$$C_{12} = (\alpha_{12}^2 - \alpha_{11}^2) - (\alpha_{22}^2 - \alpha_{21}^2);$$

$$C_{13} = (5\alpha_{12} - \alpha_{11}) - (11\alpha_{22} - 7\alpha_{21}) \quad (7)$$

Виходячи з (7), амплітуди гармонік струму визначаються:

$$I_{(k)} = \sqrt{A_{(k)}^2 + B_{(k)}^2} \quad (8)$$

Як показали розрахунки та графічне подання їх (рис. 6), окрім 5-ї, 7-ї, 11-ї, 13-ї і т.п. гармонік сталого режиму, виникають також парні та гармоніки кратні 3-м, з різним їх розкидом на інтервалі нестабільності.

В статті [6] показано, що при швидкій зміні струму можна спостерігати несиметрію струмів, що свідчить про несиметрію навантаження трансформатора. Доцільно розрахувати рівень несиметрії в несталих режимах перетворювача, який визначається коефіцієнтом несиметрії (що показано на рис. 7). Розрахунок коефіцієнта несиметрії в даній роботі проводився тільки для першої гармоніки за відомим виразом [7]

$$\varepsilon_2 = I_{(1)2} / I_{(1)1}, \quad (9)$$

де $I_{(1)1}$, $I_{(1)2}$ – струми прямої та оберненої послідовності відповідно, розраховані для першої гармоніки,

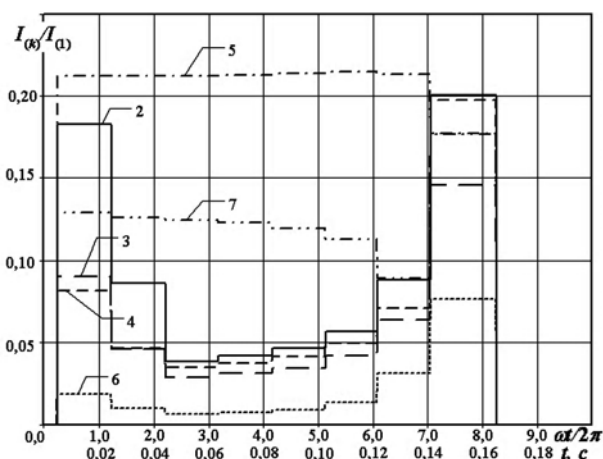


Рис. 6. Зміна гармонік струму ножиць за $t_{розр}$.

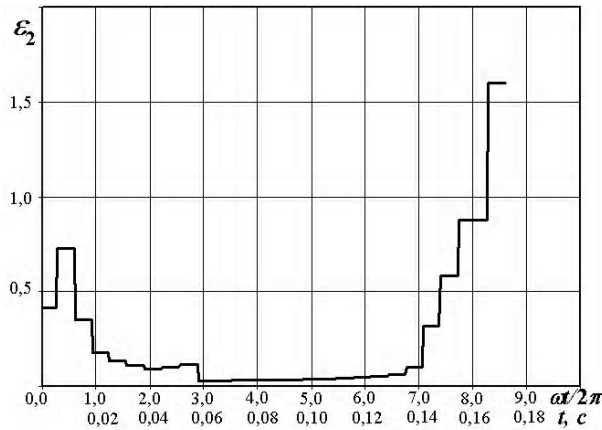


Рис. 7. Графік зміни коефіцієнту несиметрії ε_2 в несталому режимі перетворювача

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{(1)1} &= \frac{\dot{I}_{(1)A} + a \cdot \dot{I}_{(1)B} + a^{-1} \cdot \dot{I}_{(1)C}}{3}; \\ \dot{I}_{(1)2} &= \frac{\dot{I}_{(1)A} + a^{-1} \cdot \dot{I}_{(1)B} + a \cdot \dot{I}_{(1)C}}{3} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де $a = e^{j \cdot 2\pi/3}$ – комплексний множник.

Добуток будь-якого вектора та a означає поворот цього вектора у напрямку додатного відліку кутів, тобто проти годинникової стрілки на 120° . Зазначений поворот вектора можна здійснити, користуючись косинусними та синусними коефіцієнтами ряду Фур'є, тоді амплітуди струмів прямої та оберненої послідовності матимуть вигляд:

$$I_{(k)1} = \frac{1}{3} \left\{ \begin{aligned} &\left[A_{A(k)} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} B_{B(k)} - \frac{1}{2} A_{B(k)} \right) + \right. \\ &\left. + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} B_{C(k)} - \frac{1}{2} A_{C(k)} \right) \right]^2 + \\ &\left[B_{A(k)} + \left(-\frac{1}{2} B_{B(k)} - \frac{\sqrt{3}}{2} A_{B(k)} \right) + \right. \\ &\left. + \left(-\frac{1}{2} B_{C(k)} + \frac{\sqrt{3}}{2} A_{C(k)} \right) \right]^2 \end{aligned} \right\}^{1/2} \\ I_{(k)2} = \left\{ \begin{aligned} &\left[A_{A(k)} + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} B_{B(k)} - \frac{1}{2} A_{B(k)} \right) + \right. \\ &\left. + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} B_{C(k)} - \frac{1}{2} A_{C(k)} \right) \right]^2 + \\ &\left[B_{A(k)} + \left(-\frac{1}{2} B_{B(k)} + \frac{\sqrt{3}}{2} A_{B(k)} \right) + \right. \\ &\left. + \left(-\frac{1}{2} B_{C(k)} - \frac{\sqrt{3}}{2} A_{C(k)} \right) \right]^2 \end{aligned} \right\}^{1/2} \quad (11)$$

де $A_{A(k)}, A_{B(k)}, A_{C(k)}, B_{A(k)}, B_{B(k)}, B_{C(k)}$ – косинусні та синусні коефіцієнти струмів фаз A, B, C .

Як відомо з [7, 8], ідеальне урівноваження намагнічуючих сил (НС) трифазного трансформатора можливо лише за умови:

$$\sum_{s=1}^3 F_{1s\Sigma} + \sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^n F_{2si} = 0, \quad (12)$$

або після згрупування по стержням:

$$\sum_{s=1}^3 \left(F_{1s\Sigma} + \sum_{i=1}^n F_{2si} \right) = 0, \quad (13)$$

де $F_{1s\Sigma}, \sum F_{2si}$ – відповідно результуючі намагнічуючі сили стержня первинної та вторинної (при наявності n обмоток) обмотки.

З урахуванням запропонованого в (8) визначення k -ї гармоніки кінцеве рівняння матиме вигляд:

$$3 \sum_{k=1}^{\infty} \left[\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n A_{(k)i} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n B_{(k)i} \right)^2} \times \right. \\ \left. \times \sin k \left(\omega t + \psi_H - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \left(1 + 2 \cdot \cos k \frac{2\pi}{3} \right) \right] + \bar{I}_{\Sigma} = 0, \quad (14)$$

а умови врівноваження при кількості вторинних фаз, кратній трьом, виконуються, якщо приведені вторинні струми не містять:

- гармонік з порядковими номерами, кратних трьом;
- постійних складових.

Провівши аналіз неусталених режимів перетворювача (рис. 6) показує, що жодна з приведених умов не виконується.

Розрахункові вирази у спрощеному вигляді для визначення k -х гармонік одиночних установок:

- при збільшенні навантаження:

$$\bar{i}_{(k)} = \frac{1}{k} \sin k \left(\frac{\pi}{3} - \Delta\alpha \right) \times \\ \times \sqrt{1 + (1 - \Delta i) \left[(1 - \Delta i) \pm 2 \cos k 3\Delta\alpha \right]}; \quad (15)$$

- при зниженні навантаження:

$$\bar{i}_{(k)} = \frac{1}{k} \sin k \left(\frac{\pi}{3} + \Delta\alpha \right) \times \\ \times \sqrt{1 + (1 - \Delta i) \left[(1 - \Delta i) \pm 2 \cos k 3\Delta\alpha \right]}. \quad (16)$$

Залежність рівня гармонік струму мережі від зміни кута керування представлена на рис. 8.

Характеризуючи роботу розглянутого механізму, слід зазначити, що найбільш характерною величиною зміни кута $\Delta\alpha$ (з урахуванням швидкодії механізму) доцільно розглядати в межах $5 - 10^\circ$, а розглядання більшого значення $\Delta\alpha$ носить більш теоретичний характер.

Для іншого випадку, при роботі головного електроприводу блюмінга, темп зміни струму і напруги досить незначний (напруга завдання зростає до свого номінального значення за 1,8 с або за 90 періодів, струм – за 0,3 с або за 15 періодів). Це показано на рис. 9, де I_{dB} та I_{dH} вихідні струми, неревесивних тиристорних перетворювачів «Вперед» і «Назад». Рівень неканонічних гармонік надто низький (для даного при-

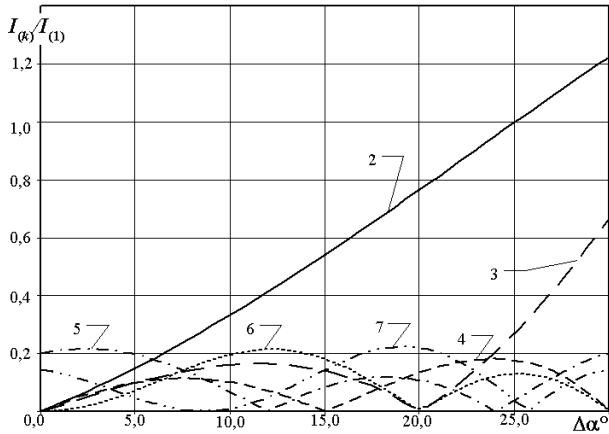


Рис. 8. Залежність рівня гармонік від зміни кута керування перетворювачем

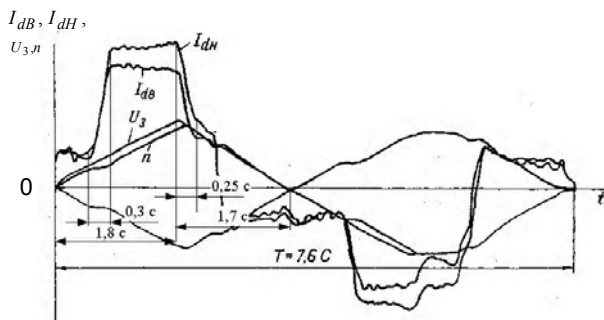


Рис. 9. Діаграма роботи головного електроприводу блюмінга

кладу $\Delta\alpha \approx 0,3^\circ$, і, як видно з рис. 8, неканонічні гармоніки наближаються до нуля, які можна невраховувати, але слід враховувати зміни балансу потужностей (рис. 10).

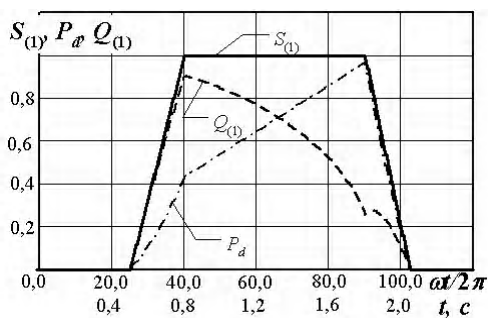


Рис. 10. Баланс потужностей головного електроприводу блюмінга

Висновки

1. Визначення енергетичних характеристик тиристорних електроприводів з керованими перетворювальними пристроями і нестабільними навантаженнями пов'язане зі специфічними умовами формування складових потужності і гармонік на інтервалах нестабільності і пропорційно залежить від швидкості зміни навантаження (струму) і кута керування.

2. Для тиристорних електроприводів постійного струму підвищеної швидкодії (наприклад, ножиць), при зміні кута керування $\Delta\alpha$ в межах $(5-8)^\circ$ і відносній зміні струму $\Delta i = (0,20-0,25)$ необхідно враховувати наявність всіх гармонік (включно з парними та кратними трьома) та виникнення несиметрії струму (для розрахункового інтервалу в межах 0,2-0,5), а для установок меншої швидкодії (наприклад, прокатного стану) доцільно враховувати лише зміну активної та реактивної потужностей.

Перелік посилань

1. Маевский О. А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
2. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
3. Родькин Д. И., Каневский В. В. Энергопотребление вентиляльных преобразователей в неустановившихся режимах работы привода // Электричество. – 1975. – №3. – С. 38-43.
4. Здрок А. Г., Силютин А. А. Выпрямительные устройства электропитания и управления (теория и расчет). – М.: Энергия, 1975. – 328 с.
5. Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей. – М.: Наука, 1970. – 320 с.
6. Сінолиций А. П., Удовенко О. О., Кольсун В. А. Електромагнітні процеси перетворювачів в нестабільних режимах роботи // Техн. електродинаміка. Тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність. – 2006. – Ч. 2. – С. 47-50.
7. Сінолиций А.Ф., Головченко В.В., Кольсун В.А. Концепция анализа и синтеза групповых систем питания и управления на основе обобщенной модели трансформатора // Разработка рудных месторождений. – 2005. – Вип. № 88. – С. 120-124.
8. Глинтерник С. Р. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей. – Л.: Наука, 1968. – 308 с.

Поступила в редакцию 06.11.07 г.

Рассмотрена работа тиристорных преобразователей постоянного тока в динамических режимах электроприводов ножиц непрерывного прокатного стана MC-250/150-6 и блюминга ОАО АРСЕЛОР МИТТАЛ. Проведен гармонический анализ тока, рассчитаны составляющие мощности и несимметрия нагрузки трансформаторов преобразователей указанных установок в соответствующих режимах.

The paper considers the research of dc thyristor converters in unstable conditions. The estimations were made on examples of unbroken mill cutter MC-250/150-6 and blooming of joint-stock company ARSELOR MITTAL. Authors performed the harmonic analysis of current; calculated the power constituents and loading asymmetry of converters transformer in the mentioned devices in correspondent modes.