

ЛЭП СВН смоделирован дополнительной нагрузкой, величина которой была определена при помощи среднегодовых потерь мощности на корону. Учитывая тот факт, что начальное напряжение короны составляет 1,1...1,3 номинального напряжения линии, модель коронного разряда подключается соответствующим ключом по достижению необходимого уровня напряжения. Так как потери на корону являются функцией от напряжения, которое распределено неравномерно вдоль ЛЭП СВН, особенностью разработанной имитационной модели является не сосредоточенный учет коронного разряда, а рассредоточенный. Такой подход позволил существенно повысить точность моделирования и был реализован путем разделения линии электропередачи на n участков с одинаковыми параметрами и имитацией отдельного коронного разряда на каждом из них. В результате исследований определена зависимость уровня перенапряжения от начального напряжения. Сделаны выводы по поводу теории использования коронного разряда для снижения уровня перенапряжений. Библиограф. 7, рис. 3, таблица.

Ключевые слова: перенапряжения, несимметричный режим работы, корона, линии сверхвысокого напряжения.

Yu.I. Tugai, Yu.G. Lykhovyd

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Modeling the influence of corona discharge on the surge in single-ended modes of extra-high voltage transmission lines

The aim of the research was to study the factors that influence the level of re-voltage power lines in the ultra-high voltage (EHV transmission lines), namely the effect of corona discharge. Especially for the necessary experiments was designed chained simulation model in MATLAB / Simulink environment, which has allowed to take into account the effect of corona discharge on the multiplicity of overvoltage. Corona discharge on power lines EHV modeled additional load, the value of which was determined by the average annual loss of power to the crown. Given the fact that the initial tension of 1.1-1.3 crown nominal line voltage, corona model connects the corresponding key to achieve the desired voltage level. Since the corona losses are a function of the voltage, which is evenly distributed along the transmission line IOS feature developed simulation model is not focused accounting corona and dispersed. This approach will significantly improve simulation accuracy, has been implemented by dividing the transmission line into n sections with the same parameters, and simulated a single corona discharge on each of them. As a result of research the dependence of the overvoltage level of the initial voltage. The conclusions about the theory of using a corona discharge to reduce the surge level. References 7, figures 3, table.

Key words: over-voltage, single-ended mode, crown, EHV line.

Надійшла 10.10.2016

Received 10.10.2016

УДК 621.316

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ МЕРЕЖА-ТРК У РЕЖИМІ ПЛАВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ. ОЦІНКА ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ МОСТОВОГО ТРК НА ЙОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНУ СУМІСНІСТЬ З МЕРЕЖЕЮ

О.І. Чиженко, докт. техн. наук, **І.В. Трач**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: trachi@ied.org.ua

Отримано аналітичні співвідношення у замкнутому вигляді стосовно електромагнітних процесів у моделі системи мережа – керований мостовий тиристорний компенсатор реактивної потужності, які відображають залежність напруг і струмів на його елементах, а також його вихідних енергетичних інтегральних показників від основних параметрів, у тому числі від величини індуктивності дроселя у колі випрямленого струму тиристорного моста. Ці співвідношення можуть бути застосовані для оптимізації режимів та параметрів мостового тиристорного компенсатора з метою забезпечення його електромагнітної сумісності з мережею, у якій він здійснює корекцію $\cos\varphi$. Бібліограф. 5, рис. 4.

Ключові слова: модель системи, мережа, ТРК, реактивна потужність, якість струму.

Важливою проблемою у вітчизняних електроенергетичних системах і мережах є покращення якості електроенергії, що передається промисловим споживачам, зокрема, забезпе-

чення належного рівня $\cos\varphi$. Вона може ефективно вирішуватися шляхом застосування в мережах тиристорних регульованих компенсаторів (ТРК) реактивної потужності [4, 5], які під навантаженням безконтактним способом здійснюють безінерційно плавне коригування реактивної потужності, що споживається мережею, для забезпечення належного $\cos\varphi$. У роботі [3] запропоновано варіант мостового ТРК за схемою, показаною на рис. 1, де вхідний трифазний LC контур (зібраний на елементах L_a, L_k, L_2, C , де L_k, L_2 – індуктивності реакторів Rk_k і Rk_2 відповідно) з метою покращення електромагнітної сумісності з мережею настроєно на певну гармоніку струму – частіше на відсутню у трифазних мережах третю гармоніку струму, а послідовні трифазні фільтри (зібрані на елементах L_2, C) настроєні на фільтрування гармонік струму, що генеруються у процесі роботи керованого випрямовуючого моста, зібраного на керованих вентилях (тиристорах) $B1...B6$, який у діагоналі випрямленого струму закорочено дроселем L_d . У роботі [2] аналізувалися електромагнітні процеси у колі моделі цього ТРК при гіпотетичному припущенні, що $L_d = \infty$, були отримані відповідні аналітичні співвідношення для напруг і струмів на її елементах, а також для вихідних енергетичних інтегральних показників цього перетворювача. Ці співвідношення з певною точністю ілюструють електромагнітні процеси в колі цієї моделі та дають змогу передусім якісно оцінити енергетичні інтегральні показники цього пристрою при роботі в мережі, проте вони обмежують можливість оптимізації параметрів обладнання цього ТРК, оскільки не допускають варіювання величини дроселя L_d .

Мета цієї роботи – з'ясувати залежність параметрів режимів та електромагнітних процесів, що протікають у колі моделі системи мережа – ТРК за схемою, представленою на рис. 1, від реальних параметрів ТРК (зокрема, від обмежених значень індуктивності L_d), а також отримати для цих процесів аналітичні описи у замкнутому вигляді, зручні для подальшого аналізу методами інтегродиференціального числення, а також ефективні для розв'язання задач оптимізації режимів та параметрів системи.

На схемі, зображеній на рис. 1, мережа, до якої підключено ТРК, змодельована трифазною системою ідеальних ЕРС з послідовними до них у кожній фазі індуктивностями L_a , що відображають індуктивність розсіювання у фазах мережі. До клем А, В і С мережі приєднано модель ТРК, де L_2, L_3 і L_d – лінійні реактивні елементи, що моделюють відповідно реактори (Rk_2 і Rk_3) та дросель (L_d), C – лінійна ємність, що моделює ємність у фазі трикутника конденсаторних батарей, $B1...B6$ – ідеальні керовані вентиля (опір яких у прямому напрямку дорівнює 0, а в зворотному – ∞), що моделюють тиристори (їх пронумеровано на рис. 1 згідно з черговістю послідовної роботи на періоді прикладеної напруги), активними опорами проводів та реактивних елементів нехтуємо, L_k – індуктивність реактора на вході фази ТРК, що необхідна для забезпечення його належного режиму. Для спрощення викладень при подальшому аналізі розглядається сумарний параметр $L_1 = L_a + L_k$ (нехай йому відповідає реактор Rk_1). Цей ТРК функціонує за принципом непрямой компенсації, а саме потужність $Q_{ТРК}$, яка генерується ТРК до мережі, складається з потужності конденсаторних батарей Q_C та індуктивної потужності Q_L , що

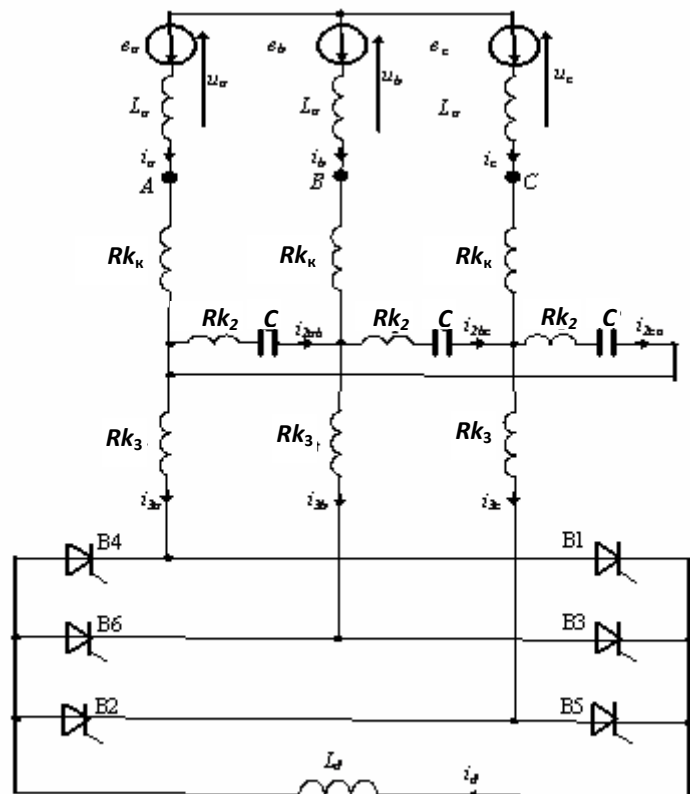


Рис. 1

створюється реакторами Rk_1, Rk_2, Rk_3 та керованим вентиляним мостом, зібраним на вентилях В1...В6, що плавно регулюється зміненням кута керування вентилями α (керування вентилями відбувається симетрично). Отже, маємо $Q_L = f(\alpha)$. Далі цю функціональну залежність позначатимемо $Q_L(\alpha)$. Таким чином, потужність $Q_{ТРК} = Q(\alpha)$, що генерується ТРК, дорівнює

$$Q(\alpha) = Q_C - Q_L(\alpha). \quad (1)$$

Діапазон змінення величини $Q_L(\alpha)$, а отже й величини $Q(\alpha)$ залежить від співвідношення між параметрами L_1, L_2, L_3 і C та вибраного інтервалу зміни кута α .

Величина індуктивності L_d впливає на якість вхідного струму (вміст у ньому вищих гармонік), а з іншого боку, погіршує масогабаритні показники ТРК, тому оптимальний вибір L_d є актуальною задачею. Найбільш ефективно розв'язання цієї задачі може бути досягнуто за наявності аналітичних виразів у замкнутому вигляді, що відображають залежність процесів у колі ТРК від величини L_d . Запропонована на рис. 1 модель системи мережа – ТРК дає змогу отримати саме такі зручні для аналізу (методами інтегродиференціального числення) аналітичні співвідношення.

З теорії вентиляних випрямлячів [1] відомо, що керований випрямний вентиляний міст (на рис. 1 його зібрано на керованих вентилях В1...В6) може функціонувати у режимах: 1) почергової роботи то чотирьох, то трьох вентилів (включно з граничними випадками постійної роботи тільки чотирьох і тільки трьох вентилів); 2) почергової роботи то трьох, то двох вентилів; 3) роботи тільки двох вентилів (режим перервного випрямленого струму). Кожному з цих режимів відповідає свій конкретний діапазон зміни кута регулювання α .

Перший з цих режимів характеризується незначною глибиною регулювання реактивної потужності $Q(\alpha)$ у області найменших її значень та високою якістю вхідного струму. Другий відповідає найбільш вагомому діапазону регулювання потужності $Q(\alpha)$. До того ж цей режим при кутах регулювання, близьких до значення $\alpha = \pi/3$, пов'язаний з суттєвими спотвореннями вхідного струму (у ньому значний вміст вищих гармонік, які генерує керований вентиляний міст). Третій режим – режим перервних випрямлених струмів також характеризується незначною глибиною регулювання величини $Q(\alpha)$. Інтервал кутів α , що відповідає цьому режиму при збільшенні індуктивності дроселя L_d , зменшується, і при досить великих значеннях L_d його ширина наближається до 0.

Явно, що для практики найбільш вагомим є другий режим, який відповідає найбільшій глибині регулювання величини $Q(\alpha)$. Тому перш за все саме для цього режиму з'ясуємо характер впливу параметра L_d на електромагнітні процеси у колі ТРК.

Нехай усі електричні кути у моделі рис. 1 відмірюються від перетину синусоїд ЕРС фаз А та С, а для трифазної системи ЕРС маємо вирази: $e_a = E_m \sin(\vartheta + \pi/6)$; $e_b = -E_m \cos \vartheta$; $e_c = -E_m \sin(\vartheta - \pi/6)$, де $\vartheta = \omega t$; $\omega = 2\pi f$; t – поточна часова координата; f – частота живлячої мережі. Тоді інтервал одночасної роботи 3-х вентилів, що має місце при другому режимі, задовольняє нерівності $\alpha \leq \vartheta \leq \alpha + \gamma$, де γ – кут комутації струму з вентиля, що чергово виходить з роботи, на вентиль, що чергово в неї входить. У випадку комутації струму з фази С на фазу А, в моделі, зображеній на рис. 1, це є вентиля В5, який при $\vartheta = \alpha + \gamma$ виходить з роботи, та В1, який при $\vartheta = \alpha$ вступає в роботу.

Рівняння, що відображають процеси у колі моделі ТРК, складені за законами Кірхгофа для інтервалу одночасної роботи трьох вентилів (у моделі рис. 1 у роботі вентиля В6, В5, В1) – інтервалу комутації, мають такий вигляд:

на інтервалі $\alpha \leq \vartheta \leq \alpha + \gamma$

$$i_a + i_b + i_c = 0; \quad i_b + i_{2ab} - i_{2ca} - i_{3b} = 0; \quad i_c + i_{2bc} - i_{2ca} - i_{3c} = 0; \quad i_{3a} + i_{3c} - i_d = 0; \quad i_{3b} + i_d = 0;$$

$$e_a - e_b = x_{L1} \frac{d}{d\vartheta} (i_a - i_b) + x_{L2} \frac{d}{d\vartheta} i_{2ab} + u_{Cab}(\alpha) + x_C \int_{\alpha}^{\vartheta} i_{2ab} d\vartheta;$$

$$e_b - e_c = x_{L1} \frac{d}{d\vartheta} (i_b - i_c) + x_{L2} \frac{d}{d\vartheta} i_{2bc} + u_{Cbc}(\alpha) + x_C \int_{\alpha}^{\vartheta} i_{2bc} d\vartheta;$$

$$\begin{aligned}
e_c - e_a &= x_{L1} \frac{d}{d\vartheta} (i_c - i_a) + x_{L2} \frac{d}{d\vartheta} i_{2ca} + u_{Cca}(\alpha) + x_C \int_{\alpha}^{\vartheta} i_{2ca} d\vartheta; \\
e_a - e_b &= x_{L1} \frac{d}{d\vartheta} (i_a - i_b) + x_{L3} \frac{d}{d\vartheta} (i_{3a} - i_{3b}) + x_d \frac{d}{d\vartheta} i_d; \\
e_b - e_c &= x_{L1} \frac{d}{d\vartheta} (i_b - i_c) + x_{L3} \frac{d}{d\vartheta} (i_{3b} - i_{3c}) - x_d \frac{d}{d\vartheta} i_d,
\end{aligned} \tag{2}$$

де i_a, i_b, i_c – вхідні фазні струми ТРК (для моделі, показаної на рис. 1, вони також є фазні струми мережі); $i_{2ab}, i_{2bc}, i_{2ca}$ – струми через конденсатори, що приєднані до відповідних фаз; i_{3a}, i_{3b}, i_{3c} – струми через реактори Rk_3 у відповідних фазах; i_d – випрямлений струм; $u_{Cab}(\alpha), u_{Cbc}(\alpha), u_{Cca}(\alpha)$ – значення напруг $u_{Cab}(\vartheta), u_{Cbc}(\vartheta), u_{Cca}(\vartheta)$ на відповідних конденсаторах при $\vartheta = \alpha$; $x_{L1} = \omega L_1$; $x_{L2} = \omega L_2$; $x_{L3} = \omega L_3$; $x_d = \omega L_d$; $x_C = 1/\omega C$.

У момент $\vartheta = \alpha + \gamma$, коли клапан В5 виходить з роботи, починається інтервал одночасної роботи тільки двох клапанів (у випадку, що розглядається, це клапани В6 та В1). Цей інтервал триває до моменту $\vartheta = \alpha + \pi/3$, коли вступає в роботу черговий клапан анодної групи (група клапанів зі спільними анодами) – клапан В2, внаслідок чого у анодній групі починається комутація струму з клапана В6 на клапан В2 (тобто з фази В на фазу С). Рівняння, що описують електромагнітні процеси при одночасній роботі клапанів В6 та В1, мають такий вигляд:

на інтервалі $\alpha + \gamma \leq \vartheta \leq \alpha + \pi/3$

$$i_a + i_b + i_c = 0; \quad i_b + i_{2ab} - i_{2ca} - i_{3b} = 0; \quad i_c + i_{2bc} - i_{2ca} = 0;$$

$$i_{3a} - i_d = 0; \quad i_{3b} + i_d = 0; \quad i_{3c} = 0;$$

$$e_a - e_b = x_{L1} \frac{d}{d\vartheta} (i_a - i_b) + x_{L2} \frac{d}{d\vartheta} i_{2ab} + u_{Cab}(\alpha + \gamma) + x_C \int_{\alpha + \gamma}^{\vartheta} i_{2ab} d\vartheta;$$

$$e_b - e_c = x_{L1} \frac{d}{d\vartheta} (i_b - i_c) + x_{L2} \frac{d}{d\vartheta} i_{2bc} + u_{Cbc}(\alpha + \gamma) + x_C \int_{\alpha + \gamma}^{\vartheta} i_{2bc} d\vartheta; \tag{3}$$

$$e_c - e_a = x_{L1} \frac{d}{d\vartheta} (i_c - i_a) + x_{L2} \frac{d}{d\vartheta} i_{2ca} + u_{Cca}(\alpha + \gamma) + x_C \int_{\alpha + \gamma}^{\vartheta} i_{2ca} d\vartheta;$$

$$e_a - e_b = x_{L1} \frac{d}{d\vartheta} (i_a - i_b) + x_{L3} \frac{d}{d\vartheta} (i_{3a} - i_{3b}) + x_d \frac{d}{d\vartheta} i_d.$$

У шестипульсному симетричному трифазному мостовому перетворювачі з симетричним управлінням клапанів моста, де, як відомо, період випрямленого струму i_d дорівнює $\pi/3$ (тобто шість разів вміщується у періоді живлячої мережі), сталі (квазісталі) електромагнітні процеси повторюються від фази до фази кожної шостої частини періоду напруги мережі, тобто на кожному інтервалі електричного кута довжиною $\pi/3$. Таким чином, рівняння (2) і (3), що описують електромагнітні процеси на інтервалі $\alpha \leq \vartheta \leq \alpha + \pi/3$, повністю відображають ці процеси, тобто їх рішення, розповсюджені з урахуванням належних зсувів кутів щодо різних фаз мережі, повністю відображають процеси на всьому періоді живлячої напруги.

Розв'язуючи рівняння (2) і (3) на інтервалах їх існування, згідно з методикою, викладеною у роботі [2], виконуємо стикування отриманих рішень на границях цих інтервалів з метою визначення сталих інтегрування. При такому стикуванні використовуються умови неперервності струмів у індуктивних реакторах і напруги на конденсаторах, а також умови симетрії, притаманні трифазному симетричному мостовому перетворювачу з симетричним управлінням клапанами. Співвідношення, що пов'язує кути α і γ , знаходимо з рівняння, яке витікає з того, що при припущенні $r_d = 0$ середнє значення U_d випрямленої напруги $u_d = di_d/d\vartheta$ теж дорівнює нулю, тобто

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi/3} u_d d\vartheta = 0. \quad (4)$$

Звідки після тождних перетворень знаходимо рівняння

$$\alpha + \frac{\gamma}{2} = \frac{\pi}{2}, \text{ або в іншій формі запису } \gamma = \pi - 2\alpha. \quad (5)$$

З рівняння (5) витікає: якщо кут $\alpha = \pi/2$, то $\gamma = 0$, тобто інтервал комутації стягується у точку. При цьому значенні кута управління вентилями у моделі, зображеній на рис. 1, у роботі весь час тільки по два вентиля. Таким чином, значення кута управління $\alpha = \pi/2$ відповідає верхній границі (за кутом α) режиму, що розглядається. Нерівність $\alpha + \gamma \leq \vartheta \leq \alpha + \pi/3$, яка відповідає позакомутаційному інтервалу з урахуванням другої рівності (5), можна переписати у вигляді $\pi - \alpha \leq \vartheta \leq \alpha + \pi/3$, звідки витікає, що при $\alpha = \pi/3$ цей інтервал стягується в точку, тобто на періоді в моделі, показаній на рис. 1, весь час працюють по три вентиля. Отже, значення $\alpha = \pi/3$ відповідає нижній границі (за кутом α) режиму. З викладеного слідує, що режим почергової роботи то двох, то трьох вентилів у моделі (рис. 1) має місце при кутах управління, що задовольняють нерівності $\pi/3 \leq \alpha \leq \pi/2$.

Після згаданого стикування з урахуванням рівняння (5) рішення рівнянь (2) і (3) набувають такого вигляду:

1) на інтервалі $\alpha \leq \vartheta \leq \pi - \alpha$

$$i_a = i_{2ab} - i_{2ca} - i_{3c} + i_d; \quad i_b = -i_{2ab} + i_{2bc} - i_d; \quad i_c = -i_{2bc} + i_{2ca} + i_{3c};$$

$$i_{2ab} = \frac{\sqrt{3}E_m}{2x_1} \left[\begin{aligned} & -C_7(\alpha) \sin \lambda \vartheta - C_8(\alpha) \cos \lambda \vartheta - \frac{\mu^2 - \lambda^2}{3\mu^2(1-\lambda^2)} \cos \vartheta + \frac{\mu^2 - \xi^2}{3\mu^2(1-\xi^2)} \sqrt{3} \sin \vartheta + \\ & + \frac{B(\alpha)}{3k_1(\alpha)} \cos \xi \left(\vartheta - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right];$$

$$i_{2bc} = i_{2ab} - \frac{\sqrt{3}E_m}{x_1} \left[\frac{\mu^2 - \xi^2}{3\mu^2(1-\xi^2)} \sqrt{3} \sin \vartheta + \frac{B(\alpha)}{3k_1(\alpha)} \cos \xi \left(\vartheta - \frac{\pi}{2} \right) \right];$$

$$i_{2ca} = \frac{\sqrt{3}E_m}{x_1} \left[C_7(\alpha) \sin \lambda \vartheta + C_8(\alpha) \cos \lambda \vartheta + \frac{\mu^2 - \lambda^2}{3\mu^2(1-\lambda^2)} \cos \vartheta \right];$$

$$i_{3a} = i_d - i_{3c}; \quad i_{3b} = -i_d;$$

$$i_c = \frac{\sqrt{3}E_m}{2x_1} \left[\begin{aligned} & C_3(\alpha) \sin \xi \vartheta + C_4(\alpha) \cos \xi \vartheta - \frac{3\mu^2(\lambda^2 - \eta^2)}{\lambda^2(\mu^2 - \eta^2)} [C_7(\alpha) \sin \lambda \vartheta + C_8(\alpha) \cos \lambda \vartheta] + \\ & + \frac{(1-\mu^2)(\lambda^2 - \eta^2)}{(1-\lambda^2)(\mu^2 - \eta^2)} \cos \vartheta + \frac{(1-\mu^2)(\xi^2 - \eta^2) \sqrt{3}}{(1-\xi^2)(\mu^2 - \eta^2)} \sin \vartheta + C_0(\alpha) \end{aligned} \right];$$

$$i_d = \frac{\sqrt{3}E_m}{x_1} \left[C_3(\alpha) \sin \xi \vartheta + C_4(\alpha) \cos \xi \vartheta - \frac{(1-\mu^2)(\lambda^2 - \eta^2)(\sigma^2 - \xi^2)}{(1-\xi^2)(\mu^2 - \eta^2)(\sigma^2 - \lambda^2)} \sqrt{3} \sin \vartheta + C_0(\alpha) \right];$$

$$u_{Cab} = \frac{3\sqrt{3}E_m \mu^2 \eta^2}{2(\mu^2 - \eta^2)} \left\{ \frac{1}{\lambda} [C_7(\alpha) \cos \lambda \vartheta - C_8(\alpha) \sin \lambda \vartheta] + \frac{1}{3\xi k_1(\alpha)} \sin \xi \left(\vartheta - \frac{\pi}{2} \right) - \right. \\ \left. - \frac{\mu^2 - \lambda^2}{3\mu^2(1-\lambda^2)} \sin \vartheta - \frac{\mu^2 - \xi^2}{3\mu^2(1-\xi^2)} \sqrt{3} \cos \vartheta \right\}; \quad (6)$$

$$u_{cbc} = \frac{3\sqrt{3}E_m\mu^2\eta^2}{2(\mu^2 - \eta^2)} \left\{ \frac{1}{\lambda} [C_7(\alpha)\cos\lambda\vartheta - C_8(\alpha)\sin\lambda\vartheta] - \frac{1}{3\xi} \frac{B(\alpha)}{k1(\alpha)} \sin\xi \left(\vartheta - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{\mu^2 - \lambda^2}{3\mu^2(1 - \lambda^2)} \sin\vartheta + \frac{\mu^2 - \xi^2}{3\mu^2(1 - \xi^2)} \sqrt{3} \cos\vartheta \right\};$$

$$u_{cca} = -u_{cab} - u_{cbe};$$

2) на інтервалі $\pi - \alpha \leq \vartheta \leq \alpha + \pi/3$

$$i_a = i_{2ab} - i_{2ca} + i_d; \quad i_b = -i_{2ab} + i_{2bc} - i_d; \quad i_c = -i_{2bc} + i_{2ca};$$

$$i_{2ab} = \frac{\sqrt{3}E_m}{x_1} \left[C_9(\alpha)\sin\sigma\vartheta + C_{10}(\alpha)\cos\sigma\vartheta + \frac{\mu^2 - \sigma^2}{3\mu^2(1 - \sigma^2)} \sin\left(\vartheta - \frac{\pi}{6}\right) \right];$$

$$i_{2bc} = \frac{\sqrt{3}E_m}{2x_1} \left[C_1(\alpha)\sin\eta\vartheta + C_2(\alpha)\cos\eta\vartheta + C_{10}(\alpha)\sin\sigma\vartheta + C_{11}(\alpha)\cos\sigma\vartheta + \frac{\mu^2 - \eta^2}{3\mu^2(1 - \eta^2)} \sqrt{3} \cos\left(\vartheta - \frac{\pi}{6}\right) + \frac{\mu^2 - \sigma^2}{3\mu^2(1 - \sigma^2)} \sin\left(\vartheta - \frac{\pi}{6}\right) \right];$$

$$i_{2ca} = -i_{2ab} - i_{2bc}; \quad i_{3a} = i_d; \quad i_{3b} = -i_d; \quad i_{3c} = 0;$$

$$i_d = \frac{\sqrt{3}E_m}{x_1} \left\{ 2 \frac{(\lambda^2 - \eta^2)(\sigma^2 - \xi^2)}{(\mu^2 - \eta^2)(\lambda^2 - \xi^2)} \left[-3 \frac{\mu^2}{\sigma^2} C_9(\alpha)\sin\sigma\vartheta + C_{10}(\alpha)\cos\sigma\vartheta + \frac{1 - \mu^2}{1 - \sigma^2} \sin\left(\vartheta - \frac{\pi}{6}\right) \right] + \frac{\xi^2(\lambda^2 - \sigma^2)}{\sigma^2(\lambda^2 - \xi^2)} C_0(\alpha) \right\},$$

$$u_{cab} = -\frac{3\sqrt{3}E_m\mu^2\eta^2}{(\mu^2 - \eta^2)} \left[\frac{1}{\sigma} [C_9(\alpha)\cos\sigma\vartheta - C_{10}(\alpha)\sin\sigma\vartheta] + \frac{\mu^2 - \sigma^2}{3\mu^2(1 - \sigma^2)} \cos\left(\vartheta - \frac{\pi}{6}\right) \right];$$

$$u_{cbe} = \frac{3\sqrt{3}E_m\mu^2\eta^2}{2(\mu^2 - \eta^2)} \left\{ \frac{1}{\eta} [C_1(\alpha)\cos\eta\vartheta - C_2(\alpha)\sin\eta\vartheta] + \frac{1}{\sigma} [C_9(\alpha)\cos\sigma\vartheta - C_{10}(\alpha)\sin\sigma\vartheta] + \frac{\mu^2 - \sigma^2}{3\mu^2(1 - \sigma^2)} \cos\left(\vartheta - \frac{\pi}{6}\right) - \frac{\mu^2 - \eta^2}{3\mu^2(1 - \eta^2)} \sqrt{3} \sin\left(\vartheta - \frac{\pi}{6}\right) \right\}; \quad (7)$$

$$u_{cca} = -u_{cab} - u_{cbe},$$

де параметри $d = x_3/x_1$, $b = x_d/x_1$; μ , η , λ , ξ , σ – множники власних частот коливальних контурів моделі (рис. 1), що виникають на різних інтервалах кута ϑ , мають вирази:

$$\mu = \sqrt{\frac{x_c}{x_{L2}}}; \quad \eta = \sqrt{\frac{x_c}{3x_{L1} + x_{L2}}}; \quad \lambda = \sqrt{\frac{x_c(x_{L1} + x_{L3})}{x_{L2}(x_{L1} + x_{L3}) + 3x_{L1}x_{L3}}} = \mu\eta \sqrt{\frac{d+1}{\mu^2 d + \eta^2}};$$

$$\xi = \sqrt{\frac{x_c(3x_{L1} + 3x_{L3} + 2x_d)}{x_{L2}(3x_{L1} + 3x_{L3} + 2x_d) + 3x_{L1}(3x_{L3} + 2x_d)}} = \mu\eta \sqrt{\frac{d + \frac{2}{3}b + 1}{\mu^2 \left(d + \frac{2}{3}b \right) + \eta^2}}; \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{x_c(2x_{L1} + 2x_{L3} + x_d)}{x_{L2}(2x_{L1} + 2x_{L3} + x_d) + 3x_{L1}(2x_{L3} + x_d)}} = \mu\eta \sqrt{\frac{d + \frac{1}{2}b + 1}{\mu^2 \left(d + \frac{1}{2}b \right) + \eta^2}},$$

при обмежених значеннях параметрів маємо $\mu > \lambda > \sigma > \xi > \eta$.

Введемо в розгляд допоміжні функції:

$$n1(\alpha) = \cos \alpha + \frac{(1-\lambda^2)(\sigma^2-\xi^2)}{(1-\xi^2)(\sigma^2-\lambda^2)} \sqrt{3} \sin \alpha; \quad n2(\alpha) = \sin \alpha - \frac{(1-\lambda^2)(\sigma^2-\xi^2)}{(1-\xi^2)(\sigma^2-\lambda^2)} \sqrt{3} \cos \alpha;$$

$$k1(\alpha) = \frac{\lambda}{\xi} \sin \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \sin \xi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \cos \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cos \xi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right);$$

$$k2(\alpha) = \frac{\lambda}{\eta} \sin \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cos \eta \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) - \cos \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \sin \eta \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right);$$

$$k3(\alpha) = \frac{\lambda}{\sigma} \sin \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \sin \sigma \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) + \cos \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cos \sigma \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right);$$

$$k4(\alpha) = \frac{\xi}{\eta} \cos \xi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cos \eta \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \sin \xi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \sin \eta \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right);$$

$$k5(\alpha) = \frac{\xi}{\sigma} \cos \xi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \sin \sigma \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) - \sin \xi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cos \sigma \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right);$$

$$k6(\alpha) = \frac{\eta}{\sigma} \sin \eta \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) \sin \sigma \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) + \cos \eta \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) \cos \sigma \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right);$$

$$m(\alpha) = 3k2(\alpha)k5(\alpha) + k3(\alpha)k4(\alpha);$$

$$k51(\alpha) = \frac{\lambda}{\xi} \frac{k5(\alpha)}{m(\alpha)} \sin \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \frac{\lambda^2(\sigma^2-\xi^2)}{\sigma^2(\lambda^2-\xi^2)} \frac{k1(\alpha)}{m(\alpha)} \cos \sigma \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right);$$

$$k62(\alpha) = \frac{\lambda}{\eta} \frac{k6(\alpha)}{m(\alpha)} \sin \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) - 4 \frac{\lambda^2(\sigma^2-\xi^2)}{\sigma^2(\lambda^2-\xi^2)} \frac{k2(\alpha)}{m(\alpha)} \cos \sigma \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right),$$

тоді сталі інтегрування з урахуванням введених позначень можна виразити співвідношеннями:

$$C_0(\alpha) = \frac{\sigma^2(1-\mu^2)(1-\xi^2)(\lambda^2-\eta^2)}{\xi^2(1-\lambda^2)(1-\sigma^2)(\mu^2-\eta^2)} C_0(\alpha);$$

$$C_0(\alpha) = n1(\alpha) + 4 \frac{\xi}{\eta} \frac{(\lambda^2-\eta^2)}{\lambda^2(1-\eta^2)} \frac{k51(\alpha)}{m(\alpha)} \left[\eta n2(\alpha) \sin \eta \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) - n1(\alpha) \cos \eta \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) \right] -$$

$$- \frac{(\lambda^2-\xi^2)}{\lambda^2(1-\xi^2)} \frac{k62(\alpha)}{m(\alpha)} \left[\xi n2(\alpha) \cos \xi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) + n1(\alpha) \sin \xi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right];$$

$$C_9(\alpha) = - \left[\frac{2\lambda^2(1-\mu^2)(1-\xi^2)(\lambda^2-\sigma^2)}{3\mu^2(1-\lambda^2)(1-\sigma^2)(\lambda^2-\xi^2)} \frac{k2(\alpha)}{k62(\alpha)} C_0(\alpha) - \frac{A(\alpha)}{k62(\alpha)} \right] \cos \sigma \frac{2\pi}{3};$$

$$C_{10}(\alpha) = C_9(\alpha) \operatorname{tg} \sigma \frac{2\pi}{3}; \quad A(\alpha) = \frac{2\lambda(1-\mu^2)(1-\xi^2)(\lambda^2-\sigma^2)}{3\mu^2(1-\sigma^2)(\lambda^2-\xi^2)} A1(\alpha);$$

$$A1(\alpha) = n1(\alpha) \left[\frac{\lambda}{(1-\lambda^2)} \cos \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \sin \eta \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) - \frac{\eta}{(1-\eta^2)} \sin \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cos \eta \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) \right] -$$

$$- n2(\alpha) \frac{\lambda^2-\eta^2}{(1-\eta^2)(1-\lambda^2)} \sin \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \sin \eta \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right);$$

$$C_7(\alpha) = \frac{\lambda}{\xi} R(\alpha) \cos \lambda \frac{\pi}{2}; \quad C_8(\alpha) = \frac{\lambda}{\xi} R(\alpha) \sin \lambda \frac{\pi}{2};$$

$$R(\alpha) = - \frac{(1-\mu^2)(\lambda^2-\sigma^2)}{3\mu^2(1-\lambda^2)(1-\sigma^2)} \left[\frac{n1(\alpha)}{k1(\alpha)} \sin \xi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \frac{n2(\alpha)}{k1(\alpha)} \xi \cos \xi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right] +$$

$$+ 2 \frac{k5(\alpha)}{k1(\alpha)} \left[C_9(\alpha) \sin \sigma \frac{2\pi}{3} + C_{10}(\alpha) \cos \sigma \frac{2\pi}{3} \right];$$

$$\begin{aligned}
 C_3(\alpha) &= -\frac{\mu^2(\lambda^2 - \eta^2)(\lambda^2 - \xi^2)}{\xi^2(\mu^2 - \eta^2)(\lambda^2 - \sigma^2)} B(\alpha) \sin \xi \frac{\pi}{2}; & C_4(\alpha) &= -\frac{\mu^2(\lambda^2 - \eta^2)(\lambda^2 - \xi^2)}{\xi^2(\mu^2 - \eta^2)(\lambda^2 - \sigma^2)} B(\alpha) \cos \xi \frac{\pi}{2}; \\
 B(\alpha) &= \frac{(1 - \mu^2)(\lambda^2 - \sigma^2)}{\mu^2(1 - \lambda^2)(1 - \sigma^2)} \left[\frac{n1(\alpha)}{k2(\alpha)} \cos \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) - \frac{n2(\alpha)}{k2(\alpha)} \lambda \cos \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right] + \\
 &+ 6 \frac{k3(\alpha)}{k2(\alpha)} \left[C_9(\alpha) \sin \sigma \frac{2\pi}{3} + C_{10}(\alpha) \cos \sigma \frac{2\pi}{3} \right]; \\
 C_1(\alpha) &= D(\alpha) \cos \eta \frac{2\pi}{3}; & C_2(\alpha) &= -D(\alpha) \sin \eta \frac{2\pi}{3}; & D(\alpha) &= \\
 &= \frac{(1 - \mu^2)(1 - \xi^2)(\sigma^2 - \eta^2)(\sigma^2 - \lambda^2)}{6\mu^2(1 - \eta^2)(1 - \lambda^2)(1 - \sigma^2)(\xi^2 - \sigma^2)} \left[\frac{n2(\alpha)}{k2(\alpha)} \lambda \cos \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) - \frac{n1(\alpha)}{k2(\alpha)} \cos \lambda \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right] - \\
 &- \frac{k3(\alpha)}{k2(\alpha)} \left[C_9(\alpha) \sin \sigma \frac{2\pi}{3} + C_{10}(\alpha) \cos \sigma \frac{2\pi}{3} \right].
 \end{aligned} \tag{9}$$

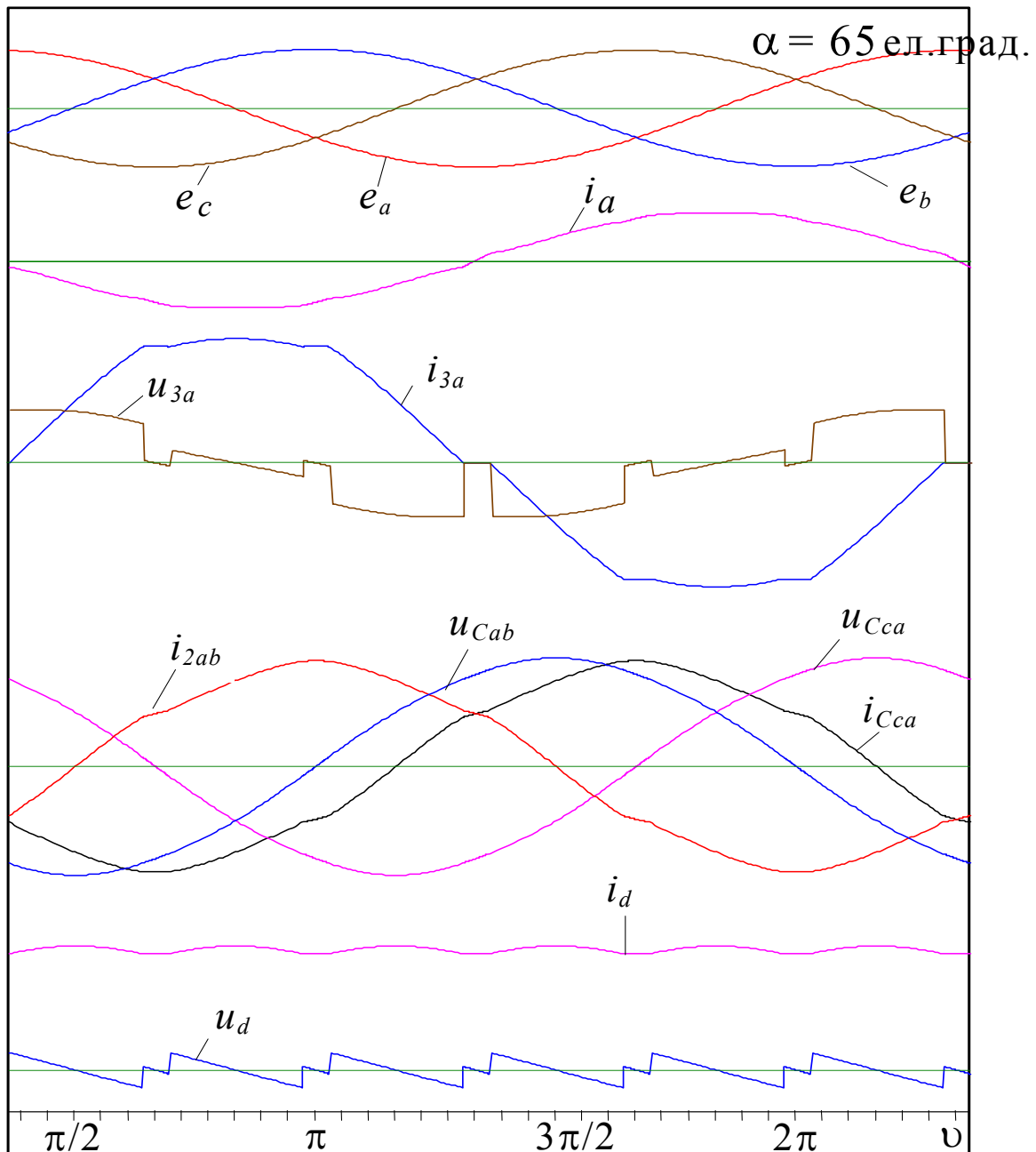


Рис. 2

За формулами (5) і (6) з урахуванням виразів (8) і (9) на рис. 2 побудовано часові діаграми струмів і напруг на елементах моделі, показаній на рис. 1, для кута управління $\alpha = 5$ ел. град. та значень параметрів ТРК $\mu = 5$, $\eta = 3$, $d = 15$, $b = 20$.

На рис. 2 усі напруги нормовані за $\sqrt{3}E_m$, а струми – за $\sqrt{3}E_m / 40x_{L1}$; по осі абсцис відлік електричного кута ϑ починається від його значення $\vartheta = \alpha$. Для напруги на реакторах враховувалось, що $u_{3a} = x_{L3} di_{3a} / d\vartheta$; $u_d = x_d di_d / d\vartheta$. При вибраних параметрах ТРК власні частоти його коливальних контурів дорівнюють $\eta f = 150$ Гц, $\mu f = 250$ Гц, $\lambda f = 153$ Гц, $\xi f = 151,9$ Гц, $\sigma f = 151,7$ Гц. На рис. 3 для тих же параметрів ТРК $\mu = 5$, $\eta = 3$, $d = 15$, $b = 20$ побудовано сімейство часових діаграм вхідного фазного струму i_a для різних значень кута управління α . З метою полегшення побудови ці діаграми побудовано для відрізка $\alpha \leq \vartheta \leq \alpha + 2\pi$, що дорівнює періоду струму i_a . Тому кожна з цих діаграм починається зі значення $i_a(\alpha)$ і закінчується значенням $i_a(\alpha + 2\pi)$. На решті частин осі ϑ криві струму i_a на рис. 3 не показані.

З урахуванням умов симетрії струмів у симетричному мостовому перетворювачі для інтегральних характеристик струму i_a мають місце співвідношення

$$I_{(1)} = -\frac{\sqrt{2}}{\pi} \int_0^{\pi} i_a \cos\left(\vartheta + \frac{\pi}{6}\right) d\vartheta = -\frac{\sqrt{2}}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi/3} \left[i_a \sin\left(\vartheta - \frac{\pi}{6}\right) + i_c \sin\left(\vartheta + \frac{\pi}{6}\right) \right] d\vartheta; \quad (10)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_a^2 d\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi/3} (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) d\vartheta}; \quad I_{\text{вг}} = \sqrt{I^2 - I_{(1)}^2}; \quad K_{\text{г}} = \frac{I_{\text{вг}}}{I} 100\%,$$

де I , $I_{(1)}$ та $I_{\text{вг}}$ – відповідно діючі значення фазного струму, його першої гармоніки та усіх вищих гармонік у сукупності; $K_{\text{г}}$ – коефіцієнт гармонік. Якщо підставимо у правих частинах формул (10) відповідні вирази для фазних струмів із співвідношень (6) та (7), можемо отримати вирази для їх інтегральних характеристик I , $I_{(1)}$, $I_{\text{вг}}$ та $K_{\text{г}}$. Ці вирази досить громіздкі, тому тут не приводяться.

На рис. 4 для режиму $\pi/3 \leq \alpha \leq \pi/2$ побудована залежність коефіцієнта $K_{\text{г}}$ від величини реактивної потужності, яка генерується ТРК у мережу, $Q = 3EI_{(1)}$, де $E = E_m / \sqrt{2}$; $\sin\varphi = 1$, оскільки у колі ТРК відсутнє активне навантаження. На рис. 4 по осі абсцис відкладається відносна величина $Q^* = Q/Q_{\text{max}}$, де $Q_{\text{max}} = 3E^2 / (x_c - 3x_1 - x_{L2})$ – максимальне значення реактивної потужності Q , що має місце у випадку, коли усі вентилі В1...В6 у моделі (рис. 1) закриті. Ємнісна реактивна потужність $Q = Q(\alpha)$ монотонно зростає зі зростанням кута управління α .

З рис. 4 видно, що при регулюванні (змінюючи кута α) реактивної потужності $Q(\alpha)$ у діапазоні $0,5Q_{\text{max}} < Q \leq Q_{\text{max}}$ вплив індуктивності L_d ($L_d = bL_1$) дроселя на процеси в системі мережа – ТРК за схемою рис. 1 незначний – коефіцієнт $K_{\text{г}}$ при $L_d > 0$ не перебільшує і на піввідсотка цей показник для найкращого на цьому діапазоні випадку $L_d = 0$ ($b = 0$). Навпаки, для діапазону регулювання $0 < Q \leq 0,5Q_{\text{max}}$ наявність цього дроселя покращує якість фазних струмів системи, оскільки суттєво зменшує в них вміст вищих гармонік. Визначення оптимального значення індуктивності дроселя L_d та його масогабаритних показників є предметом для розв'язання відповідних задач оптимізації, але це виходить за межі цієї роботи.

Висновки. 1. Отримано аналітичні у замкнутому вигляді вирази, що описують електромагнітні процеси у системі мережа – ТРК за схемою рис. 1, які придатні для подальшого розв'язання задач оптимізації її режимів та параметрів.

2. Коефіцієнт гармонік у струмі мережі в моделі системи мережа-ТРК, що досліджувався, не перевищує трьох відсотків.

3. Встановлено, що використання дроселя у колі випрямленого струму ТРК є доцільним, якщо в мережі вимагається глибина регулювання реактивної потужності більш ніж 50 %.

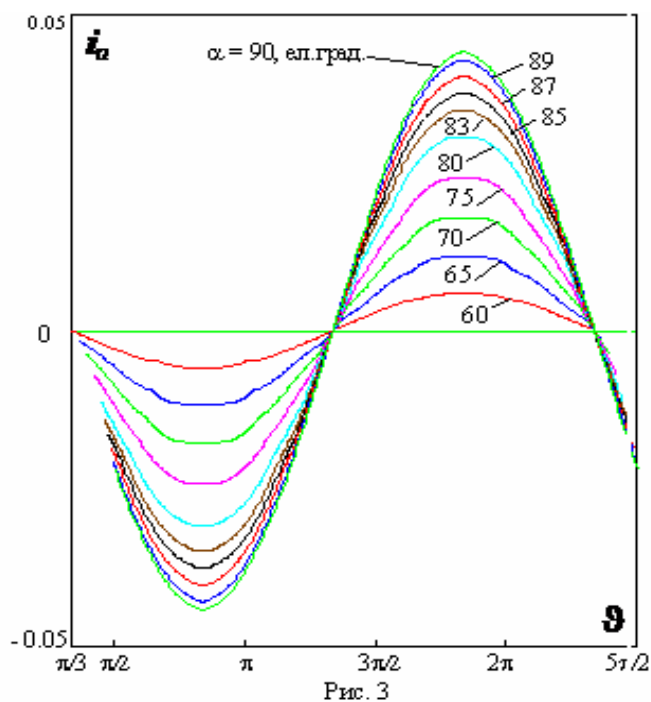


Рис. 3

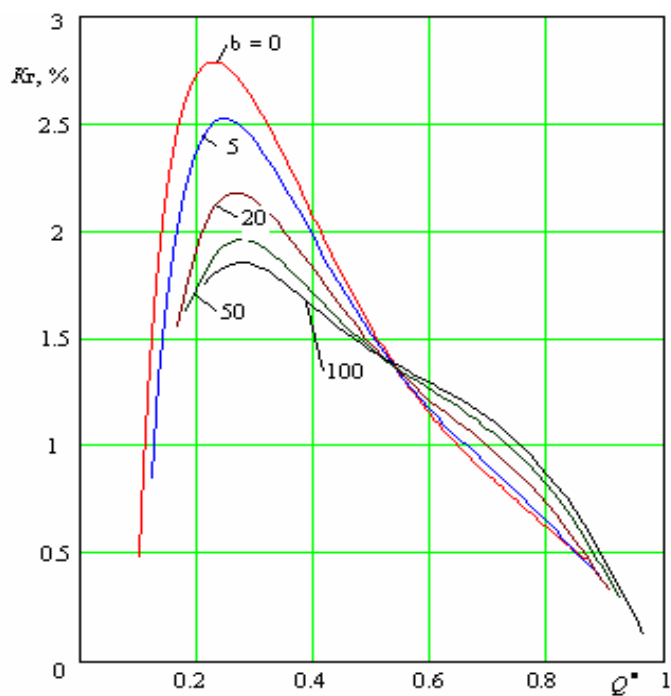


Рис. 4

1. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища шк., 1983. – 432 с.
2. Чиженко А.И. Трехфазный вентильный индуктивно-емкостный источник реактивной мощности. – Киев, 1990. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики, № 662).
3. А.с. 1367095 СССР. МКИ Н 02 J 3/18. Статический регулируемый источник реактивной мощности для трехфазных сетей / И.М. Чиженко, А.И. Чиженко, В.И. Чибелис. – Опубл. 15.01.88. Бюл. № 2.
4. Sireesha K.L., Bhushana Kumar K. Power Quality Improvement in Distribution System Using D-STATCOM// IJEAR. – Vol. 4, – Issu E, Jan – June. – 2014. – P. 58–62.
5. Meinski R., Pawelek R., Wasiak I. Shunt Compensation For Power Quality Improvement Using a STATCOM controller Modeling and Simulation // IEEE Proce, –Vol. 151. No. 2, March 2004.

УДК 621.316

А.И. Чиженко, докт. техн. наук, И.В. Трач, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Анализ электромагнитных процессов в системе сеть-ТРК в режиме плавного регулирования реактивной мощности. Оценка влияния параметров мостового ТРК на его электромагнитную совместимость с сетью
 Получены аналитические выражения в замкнутом виде для описания электромагнитных процессов в модели системы сеть – управляемый мостовой тиристорный компенсатор реактивной мощности, которые отображают зависимость напряжений и токов на его элементах, а также его выходных энергетических интегральных показателей от основных параметров, в том числе от величины индуктивности дросселя в цепи выпрямленного тока тиристорного моста. Эти соотношения могут быть использованы для оптимизации режимов и параметров мостового тиристорного компенсатора с целью обеспечения его электромагнитной совместимости с сетью, в которой он осуществляет коррекцию $\cos \varphi$. Библ. 5, рис. 4.

Ключевые слова: модель системы, сеть, ТРК, реактивная мощность, качество тока.

O.I. Chyzenko, I.V. Trach

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Analysis of electromagnetic processes in network - thyristor controlled compensator when smooth control of reactive power. Effect parameters for its thyristor compensator electromagnetic compatibility with the network
 There are analytical relations received in the closed form regarding electromagnetic processes in the system model “network – thyristor controlled compensator”. The dependence of voltages and currents on the system’s elements is determined, as well as the dependence of output energy integrated indicators on the main parameters, including the inductance value of reactor in the rectified current circuit of thyristor bridge. These ratios can be used to optimize the modes and parameters of the bridge thyristor compensator to ensure its electromagnetic compatibility with the network where it corrects $\cos \varphi$. References 5, figures 4.

Key words: thyristor controlled compensator, reactor, output energy, electromagnetic compatibility.

Надійшла 10.08.2016

Received 10.08.2016