

ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГИ НА КОМУТУЮЧИХ КОНДЕНСАТОРАХ КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ КОРИГУВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ У МЕРЕЖІ ЗА ПОСЛІДОВНОГО ПРЯМОГО ПУСКУ ГРУПИ ПОТУЖНИХ АСИНХРОННИХ МАШИН

О.І. Чиженко*, докт. техн. наук, О.Б. Рибіна**, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: alivchizh@ukr.net, rybina@i.ua.

Розглянуто процес формування перехідного значення напруги на комутуючих конденсаторах у колі умовно дванадцятифазного керованого компенсаційного перетворювача (УДККП), що живиться від електричної мережі 6 кВ в режимі послідовного прямого пуску від неї групи потужних асинхронних машин (АМ). Вказуються можливі засоби обмеження перенапруги на комутуючих конденсаторах, з'ясовується найбільш ефективний для реалізації цієї дії набір значень параметрів елементів УДККП. Визначається найбільш ефективний алгоритм управління тиристорами УДККП задля зменшення значення ємності, яка форсує збільшення компенсаційного струму. Досліджуються пускові перехідні режими, які виникають у мережі внаслідок послідовного запуску групи потужних АМ. Бібл. 10, рис. 6.

Ключові слова: перехідний пусковий режим, електрична мережа, напруга, комутуючі конденсатори, компенсаційний струм.

У роботі [1] для обмеження пускових надструмів, які виникають у мережі 6 кВ за послідовного, розтягнутого у часі, прямого пуску групи потужних асинхронних машин (АМ), було запропоновано використовувати модифікацію компенсаційного перетворювача (КП) [2], а саме умовно дванадцятифазний керований компенсаційний перетворювач (УДККП) за схемою рис. 1. У тій же роботі було складено модель об'єкту дослідження, а саме модель системи: електрична мережа – УДККП – комплексне навантаження (КН); останнє містить стаціонарну активно-індуктивну складову (позначимо її СН), а також електромеханічну складову (позначимо її ЕМН), яка містить групу АМ потужністю 8 МВт кожна.

УДККП по схемі рис. 1, як доведено у роботі [1], у перехідному пусковому режимі, а саме за послідовного прямого запуску групи потужних АМ, з успіхом компенсує індуктивні складові пускових струмів від цих АМ і СН, тим самим заважаючи їхньому потраплянню у мережу (існуюче альтернативне рішення дивіться, наприклад, у [3], в даному випадку воно менш дієве). Ця індуктивна складова при цьому замикається за контуром ЕМН–СН–УДККП, не завантажуючи мережу. Електромагнітні процеси в подібних системах досліджувалися у роботах авторів, наприклад, у [3] у простішій модифікації КП.

Електрична мережа (ЕМ) у складеній в [1] моделі моделюється трифазною системою ЕРС: $e_a = E_m \sin \vartheta$; $e_b = E_m \sin (\vartheta - 2\pi/3)$; $e_c = E_m \sin (\vartheta + 2\pi/3)$, де $\vartheta = \omega t$; $\omega = 2\pi f$; t – поточна часова координата; f – частота живлячої мережі (у випадку, який тут розглядається, $f = 50$ Гц) з послідовно ввімкненим трифазним опором $Z_{\text{мер}}$, який складається з послідовно з'єднаних опорів $x_a = \omega L_a$ і r_a – відповідно індуктивного і активного опорів мережі, в яких враховуються опори обмоток розподільчого трансформатору та опори лінії електропередачі (ЛЕП).

На рис. 1: А, В і С – вхідні клеми УДККП, якими він приєднується до фаз мережі 6 кВ; ТРФЗ – трифазний трьохобмотковий фазозсувний трансформатор, який забезпечує зсув на 30 ел. град. фази напруги на вході тиристорного моста М2 відносно напруги на вході тиристорного моста М1 (за потребою цей же трансформатор може використовуватися також для узгодження величин напруг на

© Чиженко О.І., Рибіна О.Б., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-1178-0036>; ** <https://orcid.org/0009-0003-1544-7286>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

входах мостів M1 і M2 з напругою електричної мережі); тиристорні (тобто з тиристорами B1–B6) мости M1 і M2 зібрані по схемі з відсічними діодами Д1–Д6 і комутуючими конденсаторами С; КБ1, КБ2 і КБ_{мер} – конденсаторні батареї з ввімкнутими у трикутник конденсаторами, відповідно С_Δ і С_{Δмер}; ФВГ1, ФВГ2 і ФВГ_{мер} – фільтри вищих гармонік струму з послідовними резонансними гілками, налаштованими на відповідні вищі гармоніки; $L_d = L_{d1} + L_{d2}$ – згладжуючий дросель у колі випрямленого струму УДККП; r_d – активний опір обмоток цього дроселя.

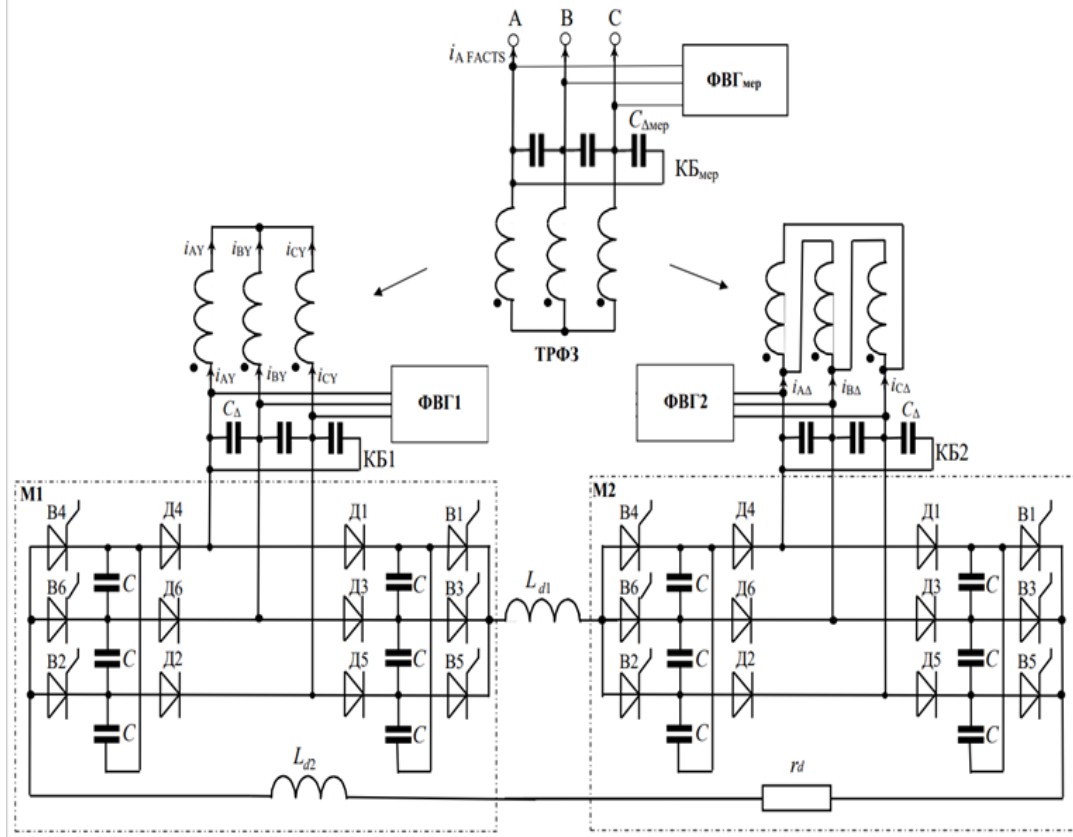


Рис. 1

Під час аналізу структури УДККП за схемою рис. 1 може виникнути враження, що елементи КБ1, КБ2, ФВГ1 і ФВГ2 на входах тиристорних мостів M1 і M2 дублюють функції аналогічних елементів КБ_{мер} і ФВГ_{мер} на вході вже самого УДККП. Насправді ж ці елементи КБ1, КБ2, ФВГ1 і ФВГ2 є необхідними частинами структури цього УДККП, у якому вони обмежують величину напруги на комутуючих конденсаторах С. Можлива перенапруга на комутуючих конденсаторах є загальним недоліком усіх перетворювачів за схемою з відсічними діодами і комутуючими конденсаторами. Дійсно, перезаряд комутуючого конденсатора за звичай здійснюється від мінімального значення лінійної напруги до її максимального значення. Так для випадку синусної напруги і випадку, коли $r_d \rightarrow 0$ (останнє відповідає УДККП, функціонуючому у режимі компенсатора реактивної потужності чи близькому до нього режиму з $r_d \approx 0$), наприклад, для фази СА – від $-U_{mca}$ до $+U_{mca}$, де U_{mca} – амплітуда лінійної напруги u_{ca} у випадку, коли вона має синусну форму (для мережі 6 кВ $U_{mca} = \sqrt{2} \cdot 6 \text{ кВ} = 8,485 \text{ кВ}$). Якщо струм мережі містить вищі гармоніки, які утворюють падіння напруги на опорах цієї мережі, то лінійна напруга мережі, а звідси і напруга вторинних обмоток ТРФ3, має несинусну форму, при цьому в ній у районі її максимальних значень зазвичай присутні піки, які можуть суттєво перевищувати значення U_{mca} . Відповідно цьому й комутуючий конденсатор перезаряджається до миттєвих значень напруги u_c , які можуть суттєво перебільшувати значення U_{mca} , тобто може статися, що в цьому випадку на від’ємній півхвилі $u_c \ll -U_{mca}$ або ж $u_c \gg +U_{mca}$ на позитивній півхвилі u_c . Такі перенапруги на комутуючих конденсаторах С можуть призвести у мостах M1 і M2 до пробую тиристорів B1–B6 і діодів Д1–Д6, а також і самих цих комутуючих конденсаторів (це спостерігалось авторами під час роботи на лабораторному стенді), тобто у такому випадку задля запобігання важких аварійних процесів потрібно використовувати високовартісні більш високовольтні тиристори, діоди і конденсатори, що може суттєво завищити вартість обладнання УДККП й тим самим знизити ефективність його застосування. Ситуація ще ускладнюється для випадку перехідних пускових режимів, за

яких миттєві значення напруги u_c , яка у цьому випадку має коливальний характер, тобто амплітуди півхвиль її коливань змінюються у часі за складним законом.

Таким чином, з'ясування особливостей режимів перезаряду комутуючих конденсаторів [5], розроблення заходів та засобів, які запобігали б виникненню значної перенапруги на комутуючих конденсаторах, є актуальною задачею, вирішення якої спрямоване на захист обладнання УДККП, а відповідно, і живлячої його мережі від тяжких аварійних режимів. При цьому особливого значення набуває оптимальний вибір параметрів елементів УДККП, який може обмежити перенапруги на комутуючих конденсаторах C .

Завдяки способу приєднання в УДККП тиристорних мостів $M1$ і $M2$ до мережі живлення зі здійсненням за допомогою ТРФЗ зсуву їх вхідної напруги одного відносно іншого на 30 ел. град. в УДККП формується вхідний струм, у якому мінімізована місткість 5-ї та частково 7-ї гармонік. Тому у фільтрах ФВГ_{мер} основну увагу акцентовано на інших вищих гармоніках струму.

Фільтри ФВГ1 і ФВГ2 на вході цих мостів здійснюють фільтрацію залишків 7-мої гармоніки. У ФВГ_{мер} здійснюється фільтрація 11-ої, 13-ої, 17-ої, 19-ої, 23-ої, 25-ої, 49-ої та 119-ої вищих гармонік струму. Під час вибору LC -параметрів цих фільтрів необхідно орієнтуватися на стандартні конденсатори і котушки індуктивностей, які серійно виробляються промисловістю з номіналами C і L та найбільш розповсюджені на практиці. При цьому добротність LCR -фільтрів вищих гармонік струму, які використовуються у подальших розрахунках, коливається від значення 17 до 28. За підібраних таким чином параметрах C , L і R тих, які далі використовуються тут у розрахунках, реактивна потужність (на першій гармоніці) фільтрів ФВГ_{мер}, ФВГ1 та ФВГ2 у сукупності дорівнює 1.357 МВА, що складає всього 4.2% від потужності 32 МВт електромеханічної складової навантаження (з 4 АМ потужністю 8 МВт кожна). У конденсаторних батареях КБ1, КБ2 значення ємностей стаціонарних конденсаторів, тобто тих, які в процесі регулювання не змінюються, становлять $C_{\Delta} = 50 \text{ мкФ}$.

У тій же роботі [1] для складеної моделі системи: ЕМ – УДККП – КН у середовищі MATLAB SIMULINK було розроблено програму розрахунків перехідних пускових режимів у цій моделі за послідовного прямого пуску від мережі 6 кВ чотирьох асинхронних машин (АМ) потужністю 8 МВт кожна. Розрахунки, проведені за цією програмою, показали, що за відсутності у структурі УДККП таких його частин як КБ1, КБ2, ФВГ1 і ФВГ2, перенапруга на комутуючих конденсаторах C в обох його мостах може сягати чотирьох десятків кіловольт (далі це буде тут доведено відповідними часовими діаграмами), що є недопустимим.

Мета роботи – аналіз процесу формування перехідної напруги на комутуючих конденсаторах УДККП та засобів її обмеження у режимі послідовного прямого пуску від ЕМ напругою 6 кВ групи потужних АМ, потужністю 8 МВт кожна.

Задля досягнення поставленої мети проведемо розрахунок напруг u_{ca} і u_c в УДККП по схемі рис. 1. Перехідний пусковий режим в цьому УДККП вже досліджувався у роботі [1], але стосовно інших його параметрів режиму. У розрахунках значення ємності $C_{\Delta \text{мер}2}$ встановимо трохи меншим, ніж у роботі [1], а саме $C_{\Delta \text{мер}2} = 1450 \text{ мкФ}$. Інші значення параметрів елементів УДККП такі ж самі, що і у роботі [1]. Відрізняється трохи лише алгоритм подачі імпульсів управління на управляючі електроди тиристорів, а саме в процесі функціонування цієї системи кути управління α тиристорів у мостах $M1$ і $M2$ змінюються таким чином: у моменти пуску АМ1 і АМ2, тобто у моменти: $t_{\text{фор} \text{АМ}1} = 0.1 \text{ с}$ і $t_{\text{фор} \text{АМ}2} = 0.145 \text{ с}$, як і у роботі [1], вони набувають значень відповідно $\alpha_{\text{фор} \text{АМ}1} = -90 \text{ ел.град.}$ і $\alpha_{\text{фор} \text{АМ}2} = -81 \text{ ел.град.}$, а на етапі спадання значень струму $i_{\text{АПККП}+\text{КБ}}$, тобто у момент $t = t_{\text{змен}1} = 2.3 \text{ с}$ встановлюється кут управління $\alpha = \alpha_{\text{змен}1} = -90 \text{ ел.град.}$, а у момент $t = t_{\text{змен}2} = 3.2 \text{ с}$ – кут управління $\alpha = \alpha_{\text{змен}2} = -102 \text{ ел.град.}$ На інтервалі $0 < t < 0.1 \text{ с}$, як і у роботі [1], УДККП функціонує у режимі очікування пуску АМ1 з кутом $\alpha = \alpha_{\text{мін}} = -104 \text{ ел.град.}$ якого достатньо для компенсації на цьому інтервалі індуктивної складової струму i_H . У розрахунках як модель асинхронної машини (АМ) потужністю 8 МВт використовувалася модель АМ, наведена у роботі [6]. Принципи побудови математичних моделей АМ і, зокрема, у пусковому режимі розглянуто у роботах [7–10].

Результати проведених за розробленою програмою розрахунків наведено на рис. 2 – 6 у вигляді часових діаграм перехідних струмів і напруги на елементах моделі.

На часових діаграмах рис. 2 чорним кольором показано, як у перехідному пусковому режимі на інтервалі $0 \leq t \leq 4 \text{ с}$ змінюється миттєве значення лінійної напруги u_{ca} на вході тиристорних мостів $M1$ і $M2$ УДККП по схемі рис. 1, а малиновим кольором – перехідна напруга u_c на комутуючих конденсаторах цих мостів.

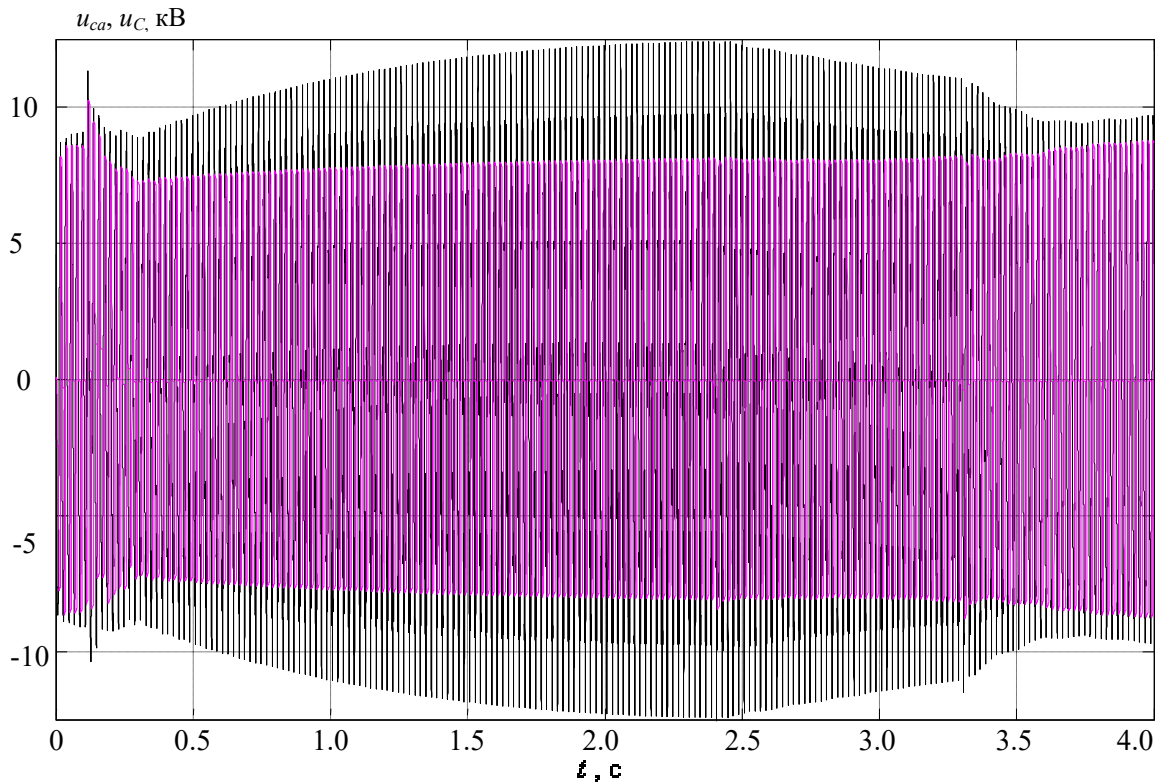


Рис. 2

З діаграм рис. 2 видно, що на більшій частині інтервалу $0 \leq t \leq 4$ с, а саме на інтервалі $0.25 \leq t \leq 4$ с напруга u_C на комутаційних конденсаторах C не перебільшує значення 8.8 кВ. Це при тому, що амплітуда півперіоду коливань напруги u_{ca} на цьому ж інтервалі, зростаючи, досягає максимального значення 10.472 кВ. На інтервалі $0 \leq t \leq 0.25$ с у момент $t \approx 0.12$ с на комутуючому конденсаторі спостерігається ударне значення напруги $U_{\text{Судар}} \approx 10.1$ кВ, яке до моменту $t = 0.277$ с досить швидко спадає до значення 7220 В. Ще одне відносно екстремальне значення напруги u_C на від'ємній півхвилі його коливань спостерігається в момент $t = 2.42$ с зразу після стрибкоподібного змінення кута управління α (зі значення $\alpha_{\text{форАМ2}} = -81$ ел. град. на значення $\alpha = \alpha_{\text{змен1}} = -90$ ел. град.), де воно складає до -8626 В. Стрибки значень перехідної напруги u_C таким чином виключно пов'язані з комутаціями АМ чи з різкою зміною кутів α . За відсутності вищезгаданих комутацій і переключень напруга на квазіусталеній частині ($0.25 \leq t \leq 4$ с) діаграми рис. 2 є досить стабільною і знаходиться у рамках допустимих її значень.

Таким чином, за обраних параметрах елементів моделі УДККП і запропонованому алгоритмі управління тиристорами суттєвої перенапруги на комутуючих конденсаторах у перехідному пусковому режимі мережі з таким УДККП не спостерігається, тобто аварійні внаслідок перенапруги на комутуючих конденсаторах режими (як-то пробої тиристорів, діодів і самих комутуючих конденсаторів) за таких значеннях параметрів і алгоритмі маловірогідні, що вигідно вирізняє це схемо-технічне рішення з такими спеціально підібраними значеннями параметрів його елементів

На діаграмах рис. 3 показано як змінюються напруги u_{ca} і u_C на окремих характерних інтервалах перехідного режиму. З другої і третьої діаграм можна побачити яких спотворень на цих інтервалах набуває напруга u_{ca} , у якій в околиці максимальних на півперіоді значень утворюються піки у вигляді тризуба. Незважаючи на досить суттєве спотворення форми лінійної напруги u_{ca} вищими гармоніками форма напруги u_C на всьому часовому інтервалі залишається незмінною. Зі зміною значень кута управління α тиристорами змінюється лише тангенс нахилу її зростаючої лінійної частини, на якій безпосередньо і відбувається повний перезаряд конденсаторів.

На першій діаграмі рис. 3 показано інтервал перехідного процесу, який передує прямому запуску першої АМ, тобто є реакцією лише на підключення стаціонарного $r_n - L_n$ навантаження. Як відомо, перехідний процес у таких тривіальних схемах є швидкоплинним і триває всього декілька періодів живлячої напруги, виходячи на усталені значення струму і напруги. Навпаки, перехідний пусковий режим у разі прямого пуску АМ потужністю 8 МВт слід віднести до важких перехідних процесів, тривалість яких вимірюються чотирма і більше секундами, тобто 200-ми періодами живлячої напруги. На четвертій

діаграмі рис. 3 показано інтервал, який передусє виходу перехідного процесу внаслідок послідовного прямого пуску від мережі 6 кВ чотирьох АМ потужністю 8 МВт кожна на ustalений режим – як видно з цієї діаграми для цього знадобився час більше, ніж 4 секунди. На другій і третій діаграмах розглянуто інтервали, які відповідають зростанню пускового струму на комплексному навантаженні, тобто i_{A4AM+H} і $i_{Aудккп}$, на яких вплив вищих гармонік струму на перехідну лінійну напругу u_{ca} , збільшується.

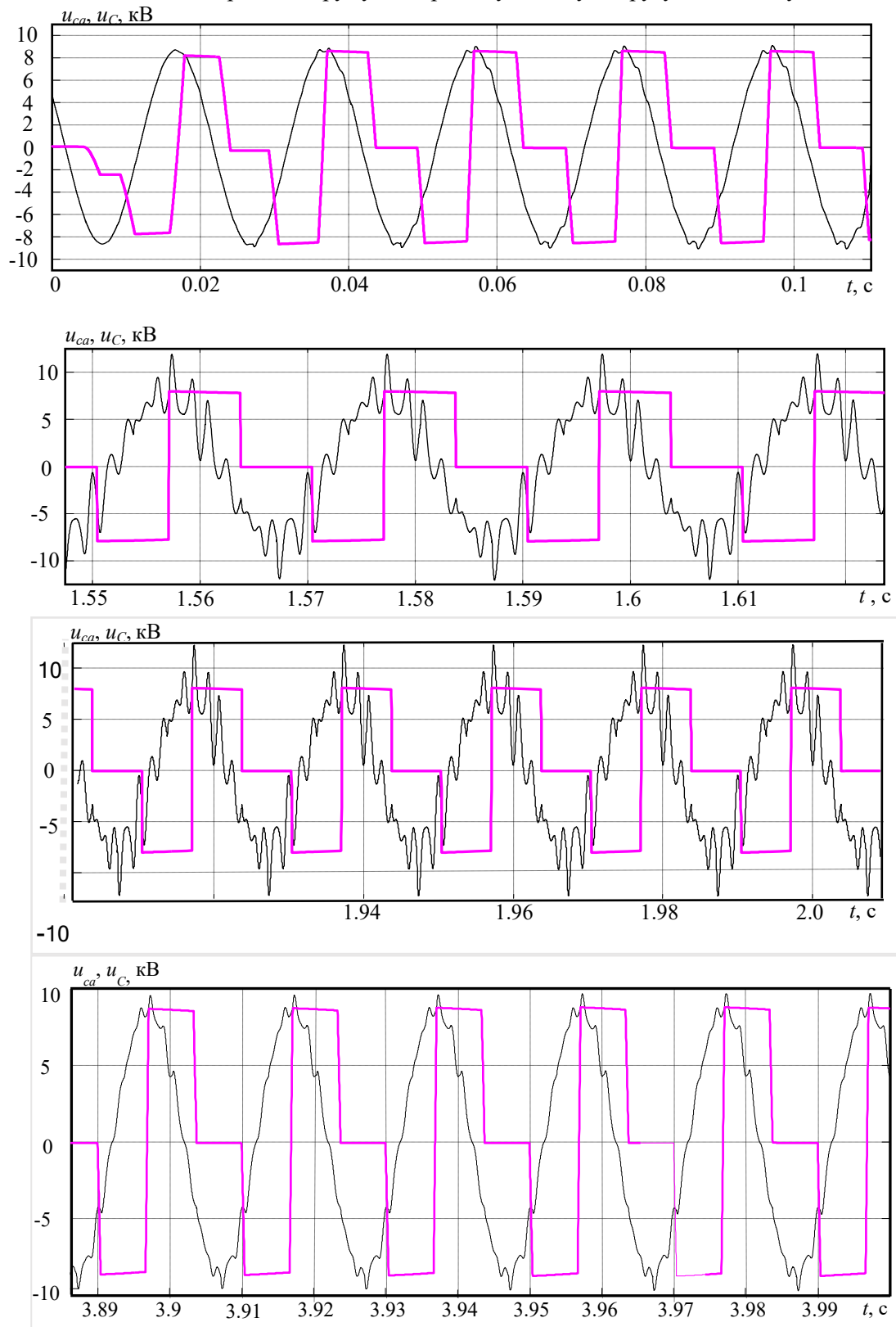


Рис. 3

Для порівняння з часовою діаграмою рис. 2 на рис. 4 (тут і далі малиновим кольором позначено напругу u_C) побудовано аналогічну діаграму, яка відображає зміну у часі напруги u_C комутуючого конденсатора у випадку, коли в УДККП по схемі рис. 1 відсутні елементи КБ1, КБ2, ФВГ1 і ФВГ2. Як видно з цієї діаграми, відсутність елементів фільтрації вищих гармонік струму призводить до значної перенапруги на комутуючих конденсаторах C в обох тиристорно-діодних мостах М1 і М2, яка сягає на діаграмі рис. 4 значення майже 40 кВ. Це пов'язано з такими ж завбільшки комутаційними піками у лінійній напрузі u_{ca} , які спостерігаються у цій напрузі за відсутності КБ1, КБ2, ФВГ1 і ФВГ2. А саме до максимальних значень цих піків і перезаряджаються комутаційні конденсатори. Таким чином, наявність в схемі УДККП елементів КБ1, КБ2, ФВГ1 і ФВГ2, які значною мірою відфільтровують вищі гармоніки струму, а останні в свою чергу є причиною виникнення в лінійній напрузі u_{ca} комутаційних піків, забезпечило зменшення перенапруги на комутуючих конденсаторах майже у чотири рази (з майже 40 кВ у діаграмах рис. 4 до $U_{C\text{удар}} \approx 10.1$ кВ у діаграмі рис. 2).

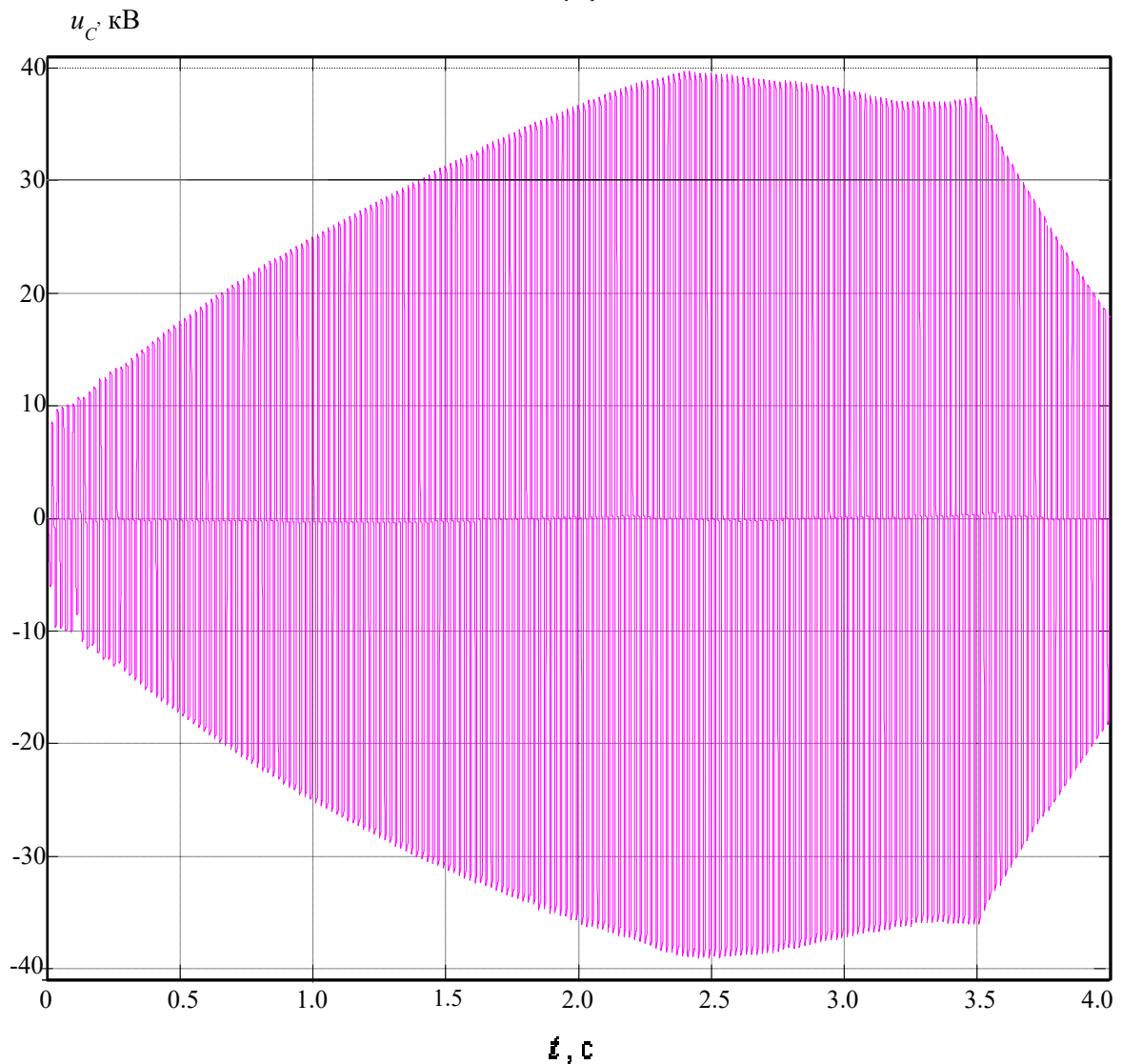


Рис. 4

Задля збереження під час розрахунків процесів на діаграмах рис. 4 і рис. 5 того ж рівня компенсації реактивної потужності в мережі, що і у діаграмах рис. 2 і рис. 3, значення ємності $C_{\text{дмер1}}$ бралися з міркувань незмінності сумарної реактивної потужності генерованої УДККП разом з конденсаторними батареями, тобто $C_{\text{дмер1}} = 150$ мкФ. Перша діаграма на рис. 5 відповідає початковій стадії перехідного режиму до прямого запуску першої АМ потужністю 8 МВт, коли лінійна напруга u_{ca} ще відносно близька до синусної форми, а друга діаграма рис. 5 навпаки – у ситуації, коли вже відбувся прямий запуск усіх чотирьох АМ потужністю 8 МВт, а напруга u_C наближається до свого максималь-

ного у перехідному режимі значення, в той час як напруга u_{ca} набуває найбільш значних спотворень. Механізм формування напруги u_C на окремих інтервалах показано на діаграмах рис. 5, а, б.

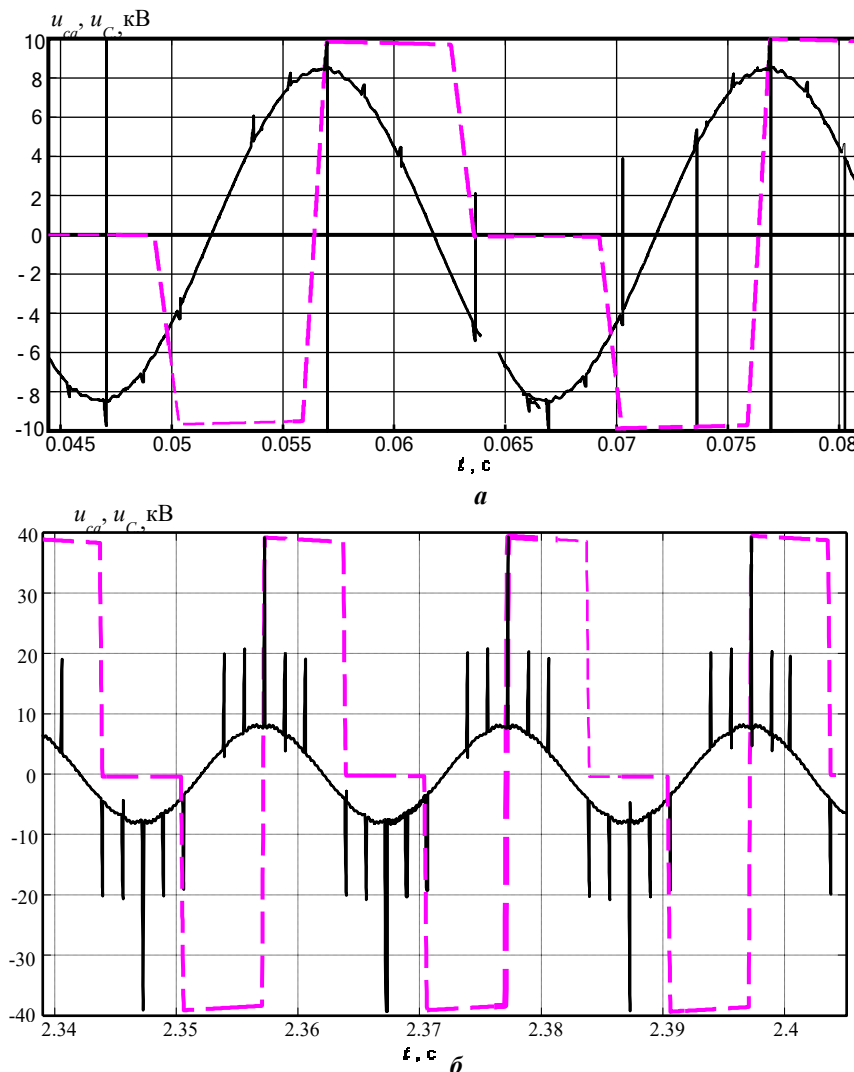


Рис. 5

На рис. 6 побудовано діаграми перехідних пускових струмів мережі, комплексного навантаження, а також фазної перехідної напруги аналогічні діаграмам, наведеним у роботі [1], тільки для іншого алгоритму зміни кутів управління α тиристорами та іншого значення ємності $C_{\Delta\text{мер}2}$ конденсаторної батареї $\text{КБ}_{\text{мер}}$, а саме значення $C_{\Delta\text{мер}2} = 1450$ мкФ. Як випливає з порівняння діаграм рис. 6 з аналогічними діаграмами, наведеними у роботі [1, рис. 3], якість компенсації індуктивної складової пускового струму на них практично така сама. Але при цьому вдалося зменшити значення ємності $C_{\Delta\text{мер}2}$ у кожній стороні трикутника конденсаторної батареї $\text{КБ}_{\text{мер}}$ на 50 мкФ.

На діаграмі (верхній) наведено коливальні пускові фазні струми $i_{\text{фмер}}$ мережі (жирним на цій діаграмі виділено струм $i_{\text{Амер}}$ фази А); на другій (зверху) діаграмі – індуктивні за характером коливальні перехідні фазні струми $i_{\text{ф4АМ+Н}}$ (жирним виділено струм $i_{\text{А4АМ+Н}}$ фази А) на вході комплексного навантаження електричної мережі, електромеханічна складова якого, а саме струм $i_{\text{А4АМ}}$ (приблизно саме такий струм був би у мережі, коли у цій моделі був би відсутнім УДККП), а його інша складова, саме струм $i_{\text{Н}}$, – через r – L опір стаціонарного навантаження Н. Ці складові разом у сумі й утворюють струм $i_{\text{А4АМ+Н}} = i_{\text{А4АМ}} + i_{\text{Н}}$; на третій діаграмі $i_{\text{АУДККП}}$ зображено ємнісні за характером коливальні фазні струми $i_{\text{фПККП+КБ}}$ (жирним виділено струм $i_{\text{АПККП+КБ}}$ фази А) УДККП (який тут розглядається як єдине ціле разом з переддвімкнутою перед ним конденсаторною батареєю $\text{КБ}_{\text{мер}}$ (рис. 1); на четвертій діаграмі показано пускову коливальну фазну напругу мережі $u_{\text{Амер}}$ на вході, тобто між фазою А і нульовим дротом.

Як можна побачити з третьої діаграми рис. 6, на інтервалі $2\text{с} \leq t \leq 2.5\text{с}$ у кривій фазного перехідного коливального струму $i_{\text{АУДККП}}$ спостерігається максимум амплітуди коливальних біля значення 15

кА, тобто умовне діюче значення цього струму на інтервалі $2 \text{ с} \leq t \leq 2.5 \text{ с}$ сягає 10.6 кА, звідки еквівалентний індуктивний опір $x_{\text{екв}} \approx 6 \text{ кВ}/10.6 \text{ кА} \approx 0.57 \text{ Ом}$, еквівалентна фазна ємність при цьому $C_{\text{екв}} \approx 5626 \text{ мкФ}$. Тобто для компенсації індуктивної складової пускового струму фазного навантаження на цьому інтервалі замість УДККП знадобився би конденсатор ємністю 5626 мікрофарад, а якщо на три фази, то трикутник конденсаторів сумарною ємністю 16828 мкФ і потужністю 190,8 МВАр.

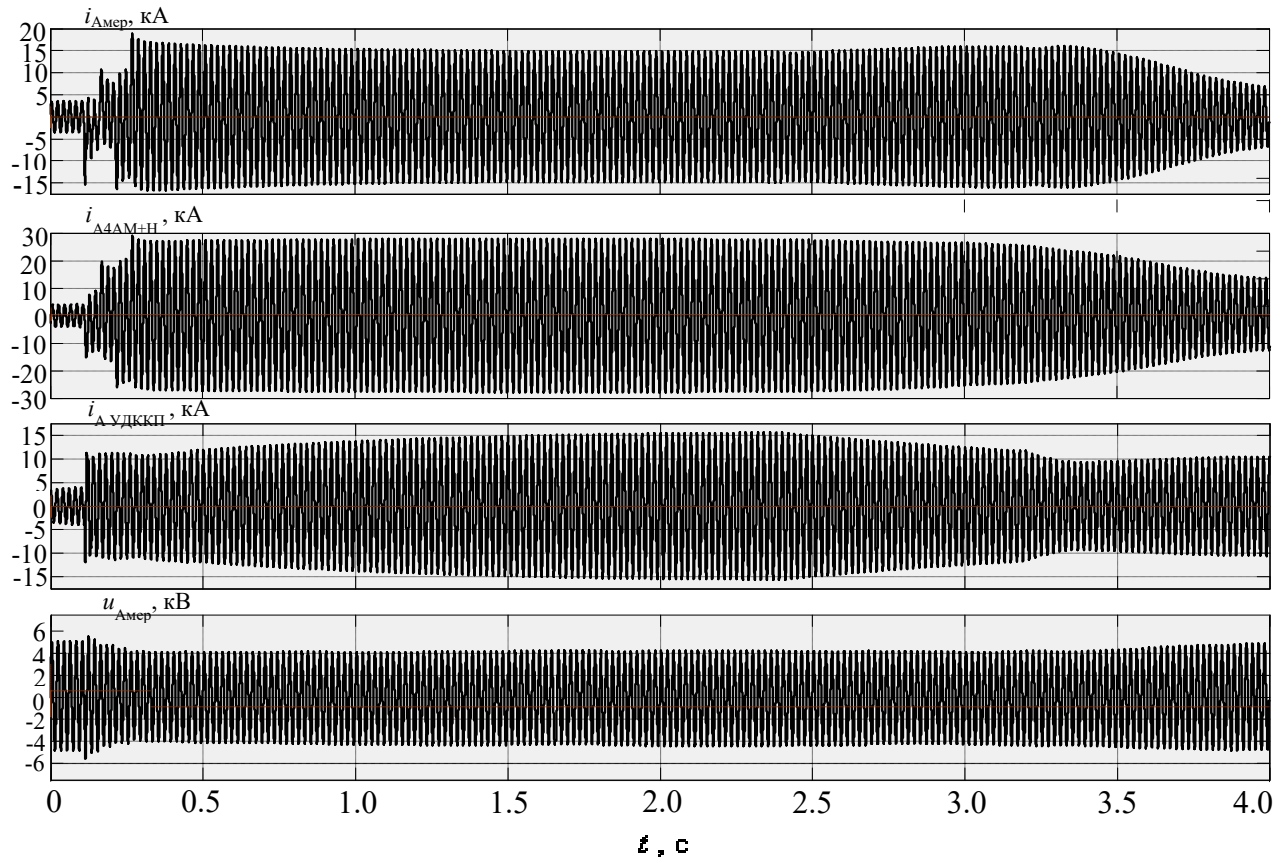


Рис. 6

Для успішного запуску АМ, тобто для успішного виходу перехідного процесу на усталений режим, необхідна належна стабільність напруги на входних клеммах цих АМ. Як видно з останньої діаграми рис. 6 максимальне просідання фазної напруги $u_{\text{Амер}}$ складає приблизно 17%. Така стабільність напруги $u_{\text{Амер}}$ є достатньою для успішного послідовного прямого запуску чотирьох АМ.

Висновок. Обрані набір значень параметрів елементів УДККП і змінений алгоритм управління його тиристорами дали можливість обмежити перенапруги на комутуючих конденсаторах у тиристорно-діодних мостах М1 і М2 УДККП. Зменшення ємності $C_{\text{Амер}2}$ у плечі КБ_{мер} на 50 мкФ (на 150 мкФ, якщо у трьох плечах разом) суттєво не вплинуло на хід перехідних пускових режимів в ЕМ 6 кВ за послідовного прямого запуску від неї групи потужних АМ (у розглянутому прикладі ці АМ були потужністю 8 МВт кожна). Наявність в схемі УДККП структурних одиниць КБ1, КБ2, ФВГ1 і ФВГ2 з належними значеннями параметрів елементів, які значною мірою відфільтровують вищі гармоніки струму, забезпечило зменшення перенапруги на комутуючих конденсаторах майже у чотири рази у порівнянні зі схемою УДККП, в якому ці елементи відсутні.

Роботу виконано за бюджетною темою "Моделі та засоби підвищення надійності розподільних електричних мереж в умовах зростання генерації відновлювальних джерел енергії" (Монітор-5). (КПКВК 6541030).

1. Чиженко О.І., Рибіна О.Б. Застосування умовно дванадцятифазного керованого компенсаційного перетворювача для послідовного прямого запуску від електричної мережі чотирьох потужних асинхронних машин. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 6. С. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.06.031>.

2. Справочник по преобразовательной технике. Під редакцією академіка НАН України Чиженка І.М. Київ: Техніка, 1978. 448 с.

3. Hong Hu, Wenmei Wu, Shaohua Xiao, Min Tan, Chuanjia Han. Summary on Reactive Power Compensation Technology and Application. Proc. of the 2nd International Conference on *Intelligent Computing and Cognitive Informatics*, Singapore, 8-9 September 2015. DOI: <https://doi.org/10.2991/icicci-15.2015.48>.

4. Бойко В.С., Шкардун О.В. Електромагнітні процеси у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 4. С. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.026>.
5. Бойко В.С., Шкардун О.В. Умови перезаряду конденсаторів комутуючої ланки трифазного мостового компенсаційного перетворювача. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 3. С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.013>.
6. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В. Вплив FACTS на режим електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>.
7. Лесник В.А., Шуруб Ю.В. Учет дифференциальных параметров при математическом моделировании несимметричных режимов работы асинхронных генераторов. *Технічна електродинаміка*. 2003. № 1. С. 45–49.
8. Попович О.М. Математична модель для дослідження режимів асинхронних машин електромеханотронних систем. *Праці Інституту електродинаміки НАНУ України*. 2010. Вип. 25. С. 89–97.
9. Попович О.М., Головань І.В. Дослідження пускових режимів асинхронних двигунів за еквівалентними параметрами квазітривимірної польової моделі. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С. 34–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.034>.
10. Красношарпа Н.Д., Пушкар М.В. Пускові режими асинхронних електроприводів з урахуванням опору лінії системи електропостачання. *Вісник ВПІ*. 2022. Вип. 1. С. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-39-43>.

MEANS LIMITING OVERVOLTAGE ON COMMUTING CAPACITORS OF THE COMPENSATION CONVERTER FOR CORRECTING OF TRANSIENT STARTING MODES IN THE NETWORK DURING SEQUENTIAL DIRECT STARTING OF GROUP POWERFUL ASYNCHRONOUS MACHINES

O.I. Chyzenko, O.B. Rybina

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.**

E-mail: alivchizh@ukr.net; rybina@i.ua.

The process of forming the transient voltage value on switching capacitors in the circuit of a conditionally twelve-phase controlled compensation converter (CTCCC), powered by a 6 kV electrical network in the mode of sequential direct start from it of four asynchronous machines (AM) with a capacity of 8 MW each, is considered. Possible means of limiting the overvoltage on switching capacitors are indicated, the most effective set of values of the parameters of their elements for implementing this action is found out. The most effective algorithm for controlling of the CTCCC thyristors is determined to reduce the value of the capacitance, which forces increasing in the compensation current. The starting transient modes that arise in the network as a result of starting such powerful AMs are research. References 10, figures 6.

Keywords: transient starting mode, electrical network, voltage, switching capacitors, compensation current.

1. Chyzenko O.I., Rybina O.B. Conditionally twelve-phase controlled compensation converter for facilitating direct start from the electrical network in series of four 8MW asynchronous machines. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 6. Pp. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.06.031>. (Ukr)
2. Chyzenko I.M. Handbook of Converter Technology. Kyiv: Tekhnika, 1978. 448 p. (Rus)
3. Hong Hu, Wenmei Wu, Shaohua Xiao, Min Tan, Chuanjia Han. Summary on Reactive Power Compensation Technology and Application. Proc. of the 2nd International Conference on *Intelligent Computing and Cognitive Informatics*, Singapore, 8-9 September 2015. DOI: <https://doi.org/10.2991/icicci-15.2015.48>.
4. Boiko V.S., Shkardun O.V. Electromagnetic processes in a three-phase bridge compensation converter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No 4. Pp. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.026>. (Ukr)
5. Boiko V.S., Shkardun O.V. Conditions for recharging the capacitors of the commutating link of the three- phase bridge compensation converter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No 3. Pp. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.013>. (Ukr)
6. Butkevych O.F., Chyzenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V. An influence of the facts upon an electrical network's mode during direct start-up of an asynchronous machine in the complex load's composition. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>. (Ukr)
7. Lesnik V.A., Shurub Yu.V. Account of differential parameters at mathematical simulation of asymmetrical operational modes of asynchronous generators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2003. No 1. Pp. 45–48. (Rus)
8. Popovych O. Mathematical model for studying the modes of induction machines of electromechanotronic systems. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2010. Vyp. 25. Pp.89–97. (Ukr)
9. Popovych O.M., Golovan I.V Study of starting regimes of induction motors using equivalent parameters of quasi -3D field model. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 1. Pp. 34–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.034>. (Ukr)
10. Krasnoshapka N.D., Pushkar M.V. Modes of Asynchronous Electric Drives Taking into Account the Resistance of the Line of the Power Supply System. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho institutu*. 2022. Vyp. 1. Pp. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-39-43>. (Ukr)

Надійшла 10.03.2025
Остаточний варіант 02.06.2025