

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.311

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.71.065>**ВСТАНОВЛЕННЯ УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ В МЕРЕЖІ З УМОВНО ДВНАДЦЯТИФАЗНИМ КЕРОВАНИМ КОМПЕНСАЦІЙНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ ПРЯМОМУ ПУСКУ ВІД НЕЇ ГРУПИ ПОТУЖНИХ АСИНХРОННИХ МАШИН****І.В. Блінов***, чл.-кор. НАН України, **О.І. Чиженко****, докт. техн. наук., **О.Б. Рибіна*****, канд. техн. наукІнститут електродинаміки НАН України,
Берестейський пр., 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: alivchizh@ukr.net, rybina@i.ua

Розглядається процес встановлення ustalених значень струмів і напруги у колі умовно дванадцятифазного керованого компенсаційному перетворювача (УДККП), який живиться від електричної мережі 6 кВ, у режимі послідовного прямого пуску від неї групи потужних (8 МВт) асинхронних машин (АМ). Будуються часові діаграми перехідних значень струмів і напруги елементів УДККП у цьому режимі. Бібл. 14, рис. 3.

Ключові слова: перехідний пусковий режим, електрична мережа, електрична асинхронна машина, часові діаграми струмів і напруги елементів кола компенсаційного перетворювача.

У промислових електричних мережах можливість різкого збільшення комплексного навантаження (КН) з потужною електромеханічною складовою є актуальною задачею, наприклад, на ТЕС і АЕС, де передбачається прямий запуск резервних насосів в їхніх системах охолодження, останні реалізуються за допомогою асинхронних машин (АМ), потужність кожної з яких може сягати 8 МВт.

Авторами у роботах [1, 2] вже досліджувалися перехідні пускові режими у мережі 6 кВ з напівпровідниковим умовно дванадцятифазним керованим компенсаційним перетворювачем (УДККП) при послідовному у часі прямому запуску від неї групи потужних АМ. Там цей перехідний пусковий режим відслідковувався на інтервалі довжиною 4 секунди від моменту підключення УДККП до електричної мережі, цього терміну вистачало до початку встановлення у мережі усталеного режиму, по завершенню розтягнутого у часі прямого пуску від неї групи потужних АМ (розглядався пуск чотирьох АМ потужністю 8 МВт кожна). Як відомо, перехідний процес встановлення усталеної напруги на вхідних клеммах АМ 8 МВт при її прямому запуску триває 3-4 секунди. Тому інтервалу $0 \leq t \leq 4$ с, де t – змінна часу, яка відраховується від моменту підключення УДККП до мережі з урахуванням того, що прямий пуск групи АМ рознесений у часі, вистачає, щоб зафіксувати лише початок встановлення усталеного режиму в такій мережі, але недостатньо, щоб зробити більш ретельний аналіз процесу встановлення усталених напруги і струмів на елементах УДККП і самої мережі. До того ж розрахунок перехідних пускових процесів у роботах [1, 2] провадився із кроком дискретизації $\Delta t = 1 \cdot 10^{-6}$, його було закладено у розробленій програмі розрахунків. При розрахунку процесів на більших інтервалах цей крок є замалим, що призводить до втрат стійкості при тривалих розрахунках.

З іншими модифікаціями компенсаційних перетворювачів і варіантами їхнього застосування можна ознайомитись у роботах [3-7]

Мета роботи: підбір довжини інтервалу часу розрахунків і значення кроку дискретизації часу у розробленій програмі розрахунків, достатніх для відображення у повному обсязі



процесу встановлення у мережі та в електричному колі УДККП усталеного режиму при прямому запуску від мережі групи АМ, потужністю 8МВт кожна.

У зв'язку з цим було проведено серію розрахунків електромагнітних процесів у моделі мережі з УДККП. У результаті таких досліджень та їхнього аналізу було запропоновано інтервал розрахунків збільшити до інтервалу $0 \leq t \leq 5$ с, а крок дискретизації при розрахунках взяти у 7 разів більший, тобто встановити $\Delta t = 7 \cdot 10^{-6}$.

Розрахунок електромагнітних перехідних процесів проводився за розробленою програмою для моделі мережі з УДККП (рис. 1), наведеної у роботі [1], для режиму послідовного у часі прямого запуску від цієї мережі чотирьох АМ потужністю 8 МВт кожна. Як і у роботі [1], прямий пуск асинхронних машин АМ1, АМ2, АМ3 і АМ4 відбувається у моменти часу: $t = t_{AM1} = 0.11$ с, $t = t_{AM2} = 0.16$ с, $t = t_{AM3} = 0.21$ с і $t = t_{AM4} = 0.26$ с. При цих розрахунках параметри елементів моделі бралися такі ж самі, що і у роботі [1], за виключенням значень ємностей конденсаторів у сторонах трикутників КБ1 і КБ2, які з метою покращення фільтрації вищих гармонік струму в цьому випадку мали значення 100 мкФ для кожного з цих конденсаторів. Змінився також і алгоритм управління тиристорами В1-В6, а саме у моменти: $t = t_{\alpha 1} = 0.0$ с, $t = t_{\alpha 2} = 0.1$ с, $t = t_{\alpha 3} = 0.145$ с, $t = t_{\alpha 4} = 2.7$ с, $t = t_{\alpha 5} = 3.5$ с відбувається стрибкоподібна зміна кутів управління ними α , а саме ці кути у вказані вище моменти відповідно набувають значень: $\alpha 1 = -104$ ел.град., $\alpha 2 = -90$ ел.град., $\alpha 3 = -82$ ел.град., $\alpha 4 = -85$ ел.град., $\alpha 5 = -95$ ел.град., де значення кутів управління наведено у електричних градусах. Ці кути відраховуються від моментів нульових значень лінійних напруг живлячої трифазної системи напруги, фазні напруги якої задаються рівняннями: $u_a = U_m \sin(\vartheta - \pi/6)$; $u_b = U_m \sin(\vartheta - \pi/2)$; $u_c = U_m \sin(\vartheta - 5\pi/6)$, де $\vartheta = \omega t$, $\omega = 2\pi f$, $f = 50$ Гц, $U_m = \sqrt{2}U \approx 5000$ Вт. При розрахунках використовувалася модель АМ 8МВт, запропонована у роботі [9]. При розробленні цієї моделі, а саме при моделюванні її елементів, враховувалось викладене у роботах [10-14].

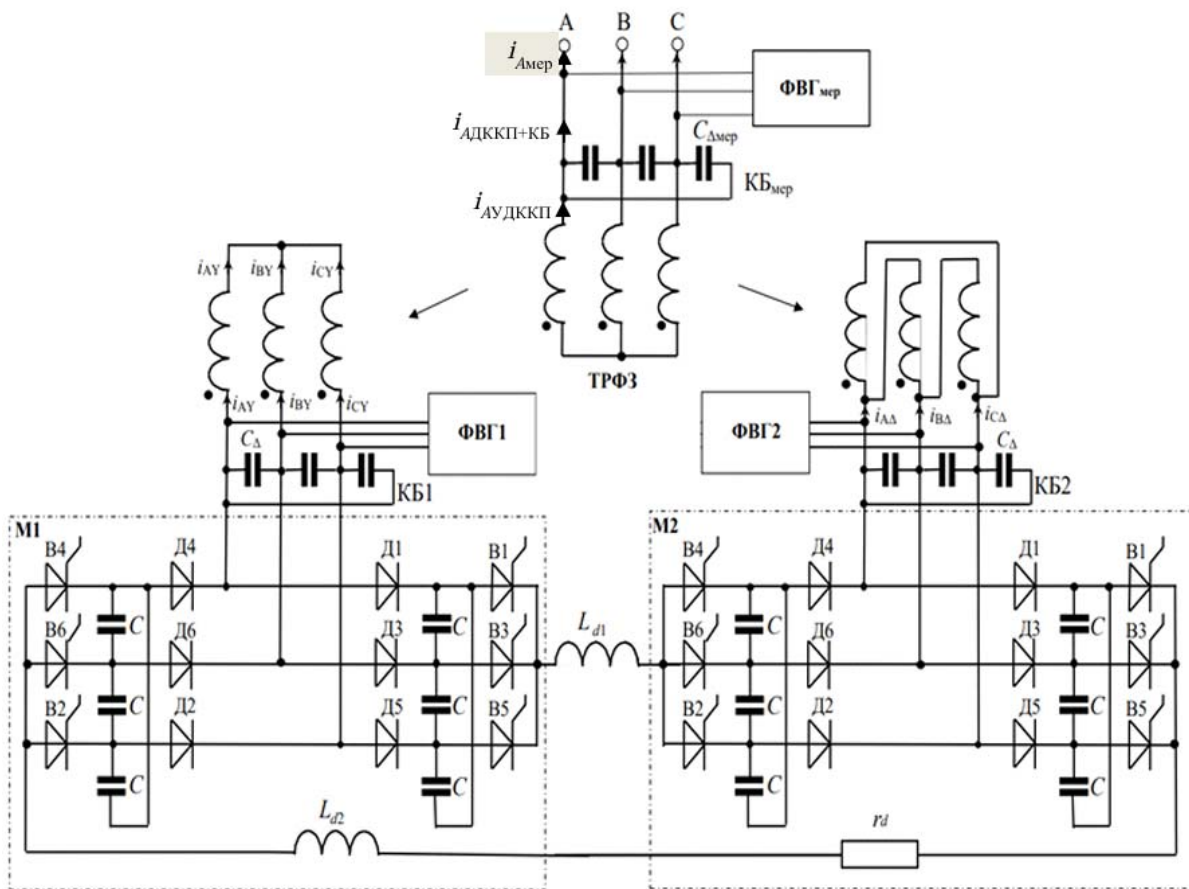


Рис. 1. Модель мережі з УДККП

На рис. 2 побудовано часові діаграми перехідних пускових фазних коливальних струму $i_{\text{фмер}}$ і напруги $u_{\text{Амер}}$ мережі – відповідно перша і четверта діаграми (напруга мережі побудована для фази А). На другій діаграмі побудовано криву перехідного фазного коливального

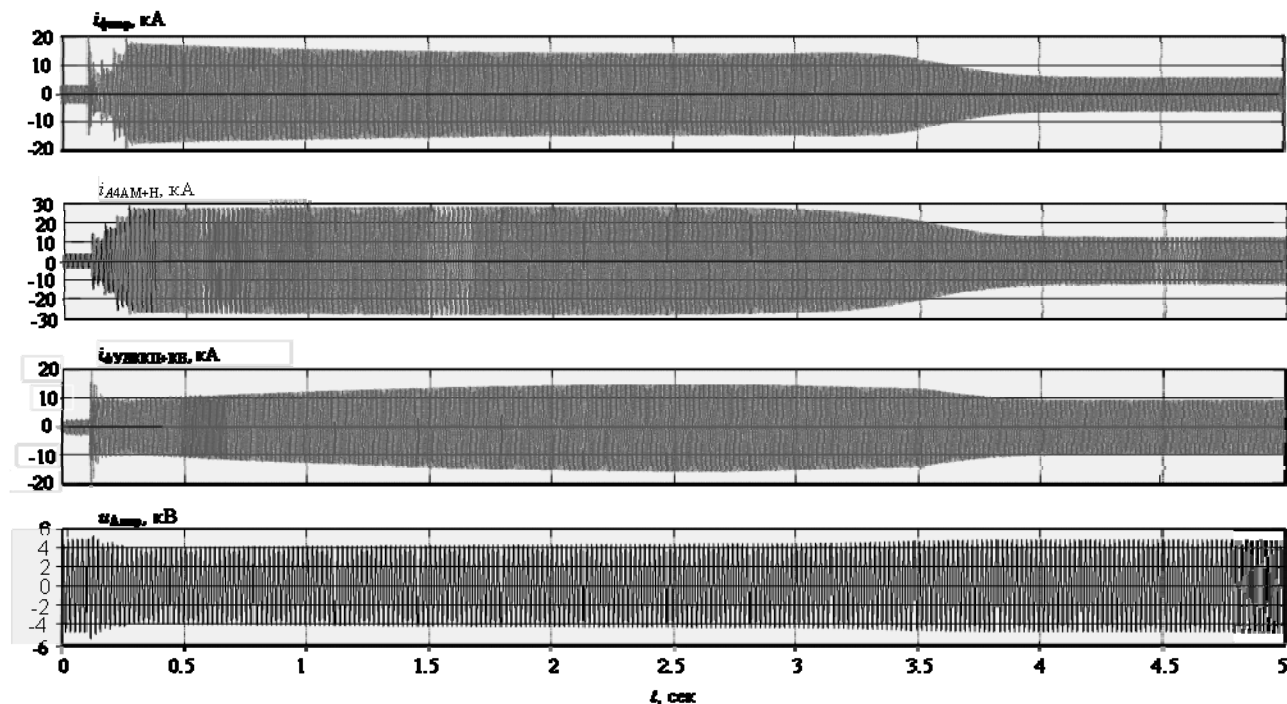


Рис. 2. Часові діаграми перехідних пускових фазних коливальних струму і напруги

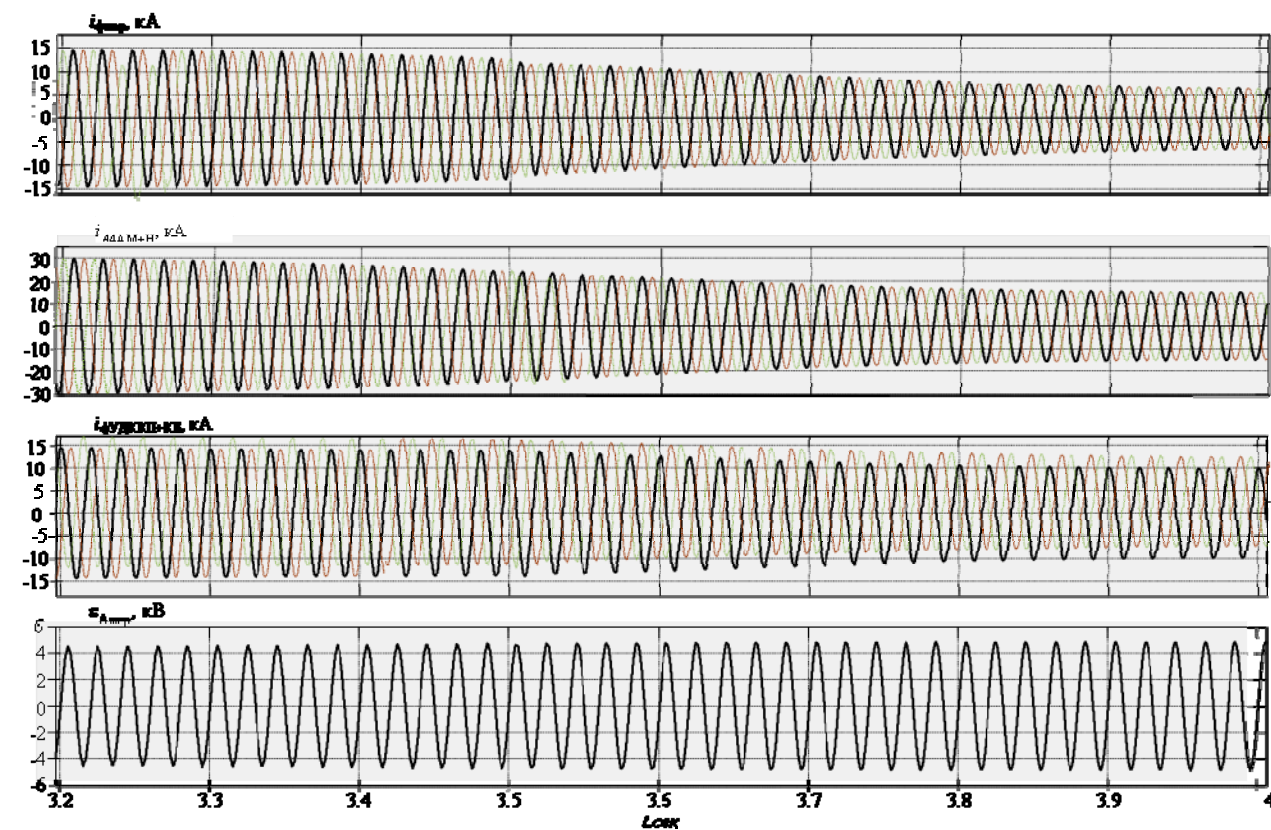


Рис. 3. Фрагмент часової діаграми з відображенням найбільш суттєвих змінень монотонно спадаючих перехідних пускових струмів і монотонно зростаючої напруги у процесі встановлення усталеного режиму

струму навантаження $i_{\text{ф4AM+H}}$, який має дві складові: перша $i_{\text{ф4AM}}$ – пусковий фазний сумарний струм від чотирьох асинхронних машин, які утворюють електромеханічну складову навантаження, та друга $i_{\text{фH}}$, – перехідний фазний струм стаціонарного R_n-L_n навантаження, тобто $i_{\text{ф4AM+H}}=i_{\text{ф4AM}}+i_{\text{фH}}$. На третій діаграмі побудовано перехідний сумарний фазний струм $i_{\text{фДККП+КБ}}$ УДККП і конденсаторної батареї КБ_{мер}, тобто маємо $i_{\text{фДККП+КБ}} = i_{\text{фУДККП}} + i_{\text{фКБ}}$. Як видно з діаграм, побудовані криві струмів і напруги складаються з їхніх перехідних значень на інтервалі $0 \leq t \leq 4\text{с}$. і, практично, з усталених їхніх значень на інтервалі $4 \text{с} \leq t \leq 5 \text{с}$.

Таким чином, діаграми рис. 2 охоплюють повністю увесь інтервал встановлення усталеного режиму.

На рис. 3 показана характерна частина діаграм рис. 2, яка відображає найбільш суттєві змінення монотонно спадаючих перехідних пускових струмів і монотонно зростаючої напруги $u_{\text{Амер}}$ у процесі встановлення усталеного режиму, ця частина відповідає інтервалу $3.2 \text{с} \leq t \leq 4 \text{с}$. На рис. 3 криві, накреслені чорним кольором, відповідають струмам фази А. Як можна побачити з діаграм рис. 3, коливальні криві другої і третьої діаграм знаходяться у протифазі, а криві першої та четвертої діаграм – у фазі. Це свідчить про те, що на цьому інтервалі відбувається повна компенсація індуктивної складової струму мережі $i_{\text{фмер}}$ ємнісним струмом $i_{\text{фДККП+КБ}}$, що генерується УДККП разом з конденсаторною батареєю КБ_{мер}.

Висновок. Обрані інтервал часу розрахунків і крок дискретизації часу при розрахунках за розробленою програмою дозволяють проілюструвати процес встановлення усталених значень струмів і напруги у колі УДККП і мережі в цілому у режимі прямого запуску від мережі 6кВ групи асинхронних машин потужністю 8 МВт кожна.

Роботу виконано за бюджетною темою: "Моделі та засоби підвищення надійності розподільних електричних мереж в умовах зростання генерації відновлюваних 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. Чиженко О.І., Рибіна О.Б. Засоби обмеження перенапруги на комутуючих конденсаторах компенсаційного перетворювача для коригування перехідних пускових режимів у мережі при послідовному прямому пуску групи потужних асинхронних машин. *Технічна електродинаміка*. 2025. № 6. С. 58–67.
3. Справочник по преобразовательной технике. Під ред. акад. НАН України Чиженка І.М. Київ.: Техніка, 1978. 448 с.
4. Чиженко І.М., Руденко В.С., Сенько В.І. Преобразовательная техника. Киев: Высшая школа, 1978. 424с.
5. Бойко, В., Шкардун, О. Електромагнітні процеси у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі. *Технічна електродинаміка*. № 4. 2023. С. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.026>
6. Бойко В., Шкардун О. Умови перезаряду конденсаторів комутуючої ланки трифазного мостового компенсаційного перетворювача. *Технічна електродинаміка*. № 3. 2023. С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.013>
7. Чибеліс В.І. Статичне умовно-дванадцятифазне джерело ємнісної реактивної потужності. *Технічна електродинаміка*. № 2. 1988. С. 31–35.
8. Hu, Hong & Wu, Wenmei & Xiao, Shaohua & Tan, Min & Han, Chuanjia. 2015. Summary on Reactive Power Compensation Technology and Application. Proceedings of the 2nd International Conference on *Intelligent Computing and Cognitive Informatics*. Singapore, 8-9 September 2015. Pp. 225–229. DOI: <https://doi.org/10.2991/icicci-15.2015.48>
9. 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/10.1109/ESS.2019.8764223>
10. Лісник В.А., Шуруб Ю.В. Учет дифференциальных параметров при математическом моделировании несимметричных режимов работы асинхронных генераторов. *Технічна електродинаміка*. 2003. № 1. С. 45–49
11. Попович О.М. Математична модель для дослідження режимів асинхронних машин електромеханотронних систем. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2010. Вип. 25. С. 89–97.
12. 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>
13. Красношапка Н.Д., Пушкар М.В. Пускові режими асинхронних електроприводів з урахуванням опору ліній системи електропостачання. *Вісник ВПІ*, 2022. Вип. 1. С. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-39-43>

14. Красношапка Н.Д. Особенности определения параметров динамической модели асинхронного двигателя с ферромагнитными экранами частей короткозамкнутой роторной обмотки. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка*. Київ, 1999. С. 98–104.

SETTING OF A STEADY MODE IN A NETWORK WITH A CONDITIONALLY TWELVE-PHASE CONTROLLED COMPENSATION CONVERTER WITH SEQUENTIAL DIRECT STARTING FROM IT OF A GROUP OF POWERFUL ASYNCHRONOUS MACHINES

I.V. Blinov, O.I. Chyzhenko, O.B. Rybina

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

Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: alivchizh@ukr.net, rybina@i.ua

The process of setting steady-state values of currents and voltages in the circuit of a conditionally twelve-phase controlled compensating converter (CTCCC), which is powered by a 6 kV electrical network, in the mode of sequential direct start from it of a group of powerful (8 MW) asynchronous machines (AM) is considered. Time diagrams of transient values of currents and voltages of the CTCCC elements in this mode are constructed. Ref. 14, fig. 3.

Keywords: transient starting mode, electrical network, electrical asynchronous machine, time diagrams of currents and voltages of the compensation converter circuit elements

1. Chyzhenko 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. Chyzhenko O.I., Rybina O.B. Means for limiting overvoltage on commutating capacitors of the compensation converter for correcting of transient starting modes in the network during sequential direct starting of four powerful asynchronous machines. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2025. No 6. Pp. 58–67. (Ukr)
3. Handbook of Converter Technology. Edited by the academy of the National Academy of Sciences of Ukraine Chyzhenko I.M. Kyiv, Technika, 1978. 448 p. (Rus)
4. Chyzhenko I.M., Rudenko V.S., Senko V.I. Conversion technology. Kyiv, Vyscha shkola, 1978. 424 p. (Rus)
5. Boiko, V. and Shkardun, O. 2023. 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)
6. Boiko, V. and Shkardun, O. 2023. 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)
7. Chibelis V.I. Static Conductions dodecaphase Sourct of the Capacity Reactive Pover. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 1988. No 2. Pp. 31–35.
8. Hu, Hong & Wu, Wenmei & Xiao, Shaohua & Tan, Min & Han, Chuanjia. 2015. Summary on Reactive Power Compensation Technology and Application. DOI: <https://doi.org/10.2991/icicci-15.2015.48>
9. Butkevych O., Chyzhenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A Study of Transitional Modes of the Electric Network with the Powerful Electromechanical Load and FACTS. Proc. 6th International Conference IEEE on *Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, 2019. Pp. 261–266. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223> (Ukr)
10. 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)
11. Popovych O. Mathematical model for studying the modes of induction machines of electromechanotronic systems. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2010. No 25. Pp. 89–97. (Ukr)
12. O.M. Popovych, I.V. Golovan. 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)
13. 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 VPI*. 2022. No. 1. Pp. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-39-43> (Ukr)
14. Krasnoshapka N.D. Features of Determining the Parameters of the Dynamic Model of an Induction Motor with Ferromagnetic Shields of Parts of a Squirrel Cage Rotary Winding. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. Electrotehnika*. 1999. Pp. 98–104. (Rus)

Надійшла: 16.07.2025

Прийнята: 19.08.2025

Submitted: 16.07.2025

Accepted: 19.08.2025