

ВЕРИФІКАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО МОСТОВОГО КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ОДНІЄЮ КОМУТУЮЧОЮ ЛАНКОЮ

Розглядається питання достовірності результатів аналітичного розрахунку випереджаючого кута регулювання силових електричних вентилів та кута регулювання трифазного мостового компенсаційного перетворювача електричної енергії з однією комутуючою ланкою. Зазначається, що величина цих кутів визначає спроможності перетворювача щодо генерації реактивної енергії разом з енергоживленням споживача електричної енергії постійного струму. Виходячи із складності аналітичного розрахунку зазначених характеристик, актуальним є питання верифікації отриманих результатів, що також є підтвердженням адекватності застосованої методики дослідження. Як інструмент досягнення мети роботи автори використовують схемотехнічне моделювання у пакеті Місто Сар. Докладно описана методика моделювання, наведені результати моделювання декількох режимів роботи перетворювача, проведено аналіз цих результатів. Порівняльний аналіз числових значень кутів регулювання і комутації, отриманих в результаті аналітичного розрахунку і схемотехнічного моделювання одних і тих же режимів роботи перетворювача, показав, що розбіжність не перевищує 5%. Це свідчить про адекватність застосованої методики моделювання і прийнятну точність результатів аналітичних розрахунків. Бібл. 3, рис. 3, табл. 3.

Ключові слова: конденсаторна батарея, схемотехнічна модель, комутуюча напруга, електричний вентиль, кут комутації, кут регулювання.

Вступ. Основними енергетичними характеристиками будь-якого компенсаційного перетворювача є кут комутації γ і випереджаючий кут регулювання α . Розрахунок величини зазначених кутів у конкретному робочому режимі перетворювача є складною математичною задачею. Причина цього у тому, що величина цих кутів залежить від низки показників робочого режиму: величини випрямленого струму (струму навантаження I_d), ємності фази комутуючих конденсаторів C , індуктивності кола змінного струму L_r , умов регулювання робочого режиму транзисторами комутуючої ланки θ та т. ін. Окрім того величини зазначених кутів залежать одна від одної.

Для аналітичного розрахунку кутів комутації і регулювання необхідно провести дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі. На основі цих досліджень отримати закономірності зміни струмів силових електричних вентилів в інтервалі комутації та отримати вираз комутуючої напруги у момент комутації. Використовуючи зазначені співвідношення скласти систему нелінійних рівнянь і розв'язати її відносно невідомих кутів γ і α . Звісно, при таких складних дослідженнях і розрахунках виникає питання верифікації отриманих результатів.

Мета роботи. На прикладі трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою здійснити верифікацію величини кутів комутації і регулювання, застосовуючи результати схемотехнічного моделювання робочих режимів досліджуваного перетворювача.

Результати досліджень. Схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою наведена на рис. 1.

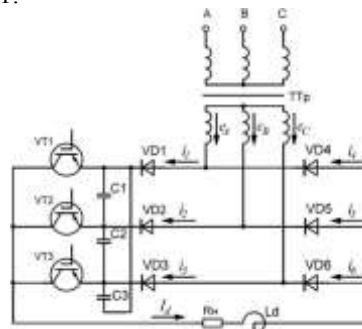


Рисунок 1 - Схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою

Перетворювач відноситься до нового покоління пристроїв силової електроніки компенсаційного типу, створення та дослідження яких ведеться у Національному технічному університеті України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» [1]. До речі, подібні дослідження ведуться і в інших країнах [2].

Досліджуваний перетворювач містить у своєму складі трифазний трансформатор (ТТр), дві трифазні групи силових електричних вентилів (VD1 – VD3 та VD4 – VD6), комутуючу ланку, яка складається з трифазної конденсаторної батареї і трифазної групи повністю керованих приладів (типів GTO, IGCT або IGBT) та навантаження R_n і L_d .

Система ЕРС трифазного перетворювального трансформатора (ТТр) схеми рис. 1 є стандартною трифазною системою прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\vartheta + \pi / 6 + \psi); \\ e_B &= E_m \sin(\vartheta - \pi / 2 + \psi); \\ e_C &= E_m \sin(\vartheta + 5\pi / 6 + \psi), \end{aligned} \quad (1)$$

де E_m - амплітуда вторинної фазної ЕРС перетворювального трансформатора; ϑ – поточна змінна; ψ – початкова фаза напруги при включенні вентиля.

Анодна група силових електричних вентилів VD4 – VD6 працює у звичайному (некомпенсаційному) режимі. Умови їх роботи такі ж, як і у трифазному мостовому випрямлячі за схемою Ларіонова.

Компенсаційний режим роботи мають силові електричні вентиля катодної групи VD1 – VD3. У контур їхньої комутації входить напруга конденсаторів комутуючої ланки, яку називають комутуючою напругою. Завдяки наявності цієї напруги силові електричні вентиля катодної групи вступають в роботу раніше моменту природньої комутації. Тобто мають випереджаючий кут регулювання α , за рахунок чого перетворювач набуває здатності генерувати реактивну енергію. Такий електромагнітний процес докладно розглянутий в [3].

У зазначеній публікації наведена нормована узагальнена система рівнянь для розрахунку кутів регулювання і комутації:

$$1 = N + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)} - \left(N + \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0^*} \gamma - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0^*} x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)} \sin \omega_{0^*} \gamma ;$$

$$\sin \alpha = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(M + \frac{1}{2} \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta\right).$$

Для розв'язку цієї системи використано метод Н'ютона. Причому, досліджується режим роботи перетворювача при керуванні транзисторами комутуючої ланки в межах своєї фази. У зазначеному режимі в наведеній вище системі рівнянь, який розглядається як приклад застосування верифікації аналітичного розрахунку, $N = 0$, а $M = \theta / 2$.

Сама ж система рівнянь, яка підлягає розв'язку, після деяких математичних перетворень, набуває вигляду:

$$F(\alpha, \gamma) = \cos(\gamma - \alpha) - \cos \alpha \cdot \cos \omega_{0^*} \gamma - (\sin \alpha \cdot \sin \omega_{0^*} \gamma) / \omega_{0^*} - x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1) ;$$

$$G(\alpha, \gamma) = \theta \cdot x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1) + \sin(\gamma - \alpha) - \sin \alpha + \sin \alpha (\cos \omega_{0^*} \gamma + 1) / \omega_{0^*}^2 - (\cos \alpha \cdot \sin \omega_{0^*} \gamma) / \omega_{0^*} .$$

У табл.1 наведені результати аналітичного розрахунку зазначеного режиму роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача, які отримані шляхом застосування методу Н'ютона до розв'язку системи двох наведених вище рівнянь.

Таблиця 1 – Дані аналітичного розрахунку

	ω_{0^*}	x_{γ^*}	Θ радіани	α градуси	γ градуси
1	3.1	0.058	0.2	5.20	20.60
2	3.1	0.058	0.4	8.39	20.60
3	3.1	0.059	0.6	11.88	20.84
4	3.1	0.060	0.8	15.52	21.12
5	3.1	0.061	1.0	19.34	21.45
6	3.1	0.062	1.2	23.38	21.86
7	3.1	0.062	1.4	27.18	22.12
8	3.1	0.062	1.6	31.13	22.45

Математичне моделювання режимів роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача, що досліджується, здійснене з використанням системи схемотехнічного моделювання Місто Сар.

Схемотехнічна модель трифазного мостового компенсаційного перетворювача, із зазначенням параметрів елементів, що відповідають досліджуваному режиму, наведена на рис. 2. Вона має такі основні складові:

1. Перетворювальний трансформатор є трифазним двообмотковим пристроєм, що живить перетворювач електричної енергії, створюючи на вторинних обмотках симетричну трифазну систему ЕРС прямого чергування фаз. ЕРС обмоток реалізовані за допомогою джерел синусоїдної напруги фаз А, В, С.

Амплітудне значення фазної ЕРС вторинної обмотки перетворювального трансформатора складає 100 В, а початкова фаза цієї напруги у фазі А дорівнює 0.523 рад (чи $\pi/6$). Тож трифазна система ЕРС вторинної обмотки перетворювального трансформатора варіантів схемотехнічної моделі досліджуваного перетворювача запишеться так:

$$e_A = 100 \sin(\vartheta + 0.523);$$

$$e_B = 100 \sin(\vartheta - 1.57);$$

$$e_C = 100 \sin(\vartheta + 2.618),$$

що відповідає співвідношенню (1), яке застосовувалось при теоретичному дослідженні процесів.

Індуктивності обмоток трансформатора, приведені до його вторинної обмотки, реалізовані за допомогою компоненти «INDUCTOR». При моделюванні режиму миттєвої комутації вони мають нульове значення, а при моделюванні інших режимів їх величина змінюється, забезпечуючи необхідне значення власної частоти контуру комутації, яке відповідає досліджуваному режиму роботи перетворювача.

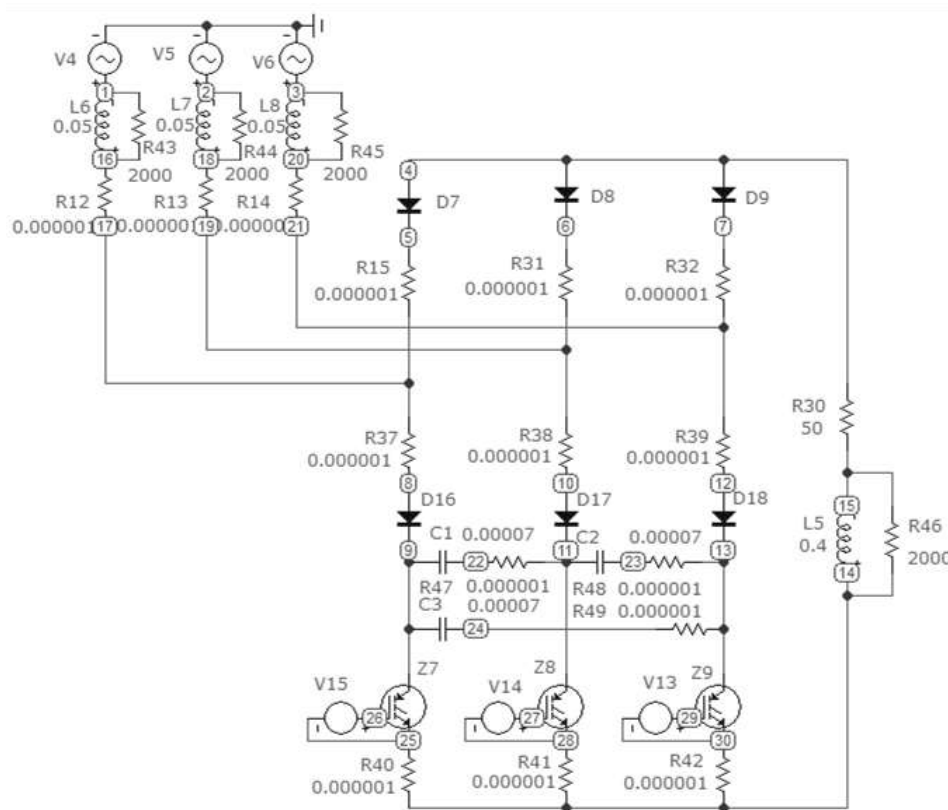


Рисунок 2 – Схемотехнічна модель трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою

Усі резистори реалізовані за допомогою компоненти «RESISTOR».

2. Діоди реалізовані за допомогою компоненти «DIODE». Характеристика діодів типу MPN3700 запозичена з бібліотеки компонентів.

3. Транзистори комутуючої ланки IGBT реалізовані за допомогою компоненти «IRG4PC50W_IR». Використана характеристика транзисторів IGBT з бібліотеки компонентів типу IXGT40N60C2.

4. Джерела для формування імпульсів керування IGBT комутуючої ланки реалізовані компонентом «PULSE SOURCE». Вони генерують імпульси практично прямокутної форми з амплітудою 8 В.

5. Конденсатори комутуючої ланки реалізовані компонентом «CAPACITOR».

6. Навантаження схемотехнічної моделі перетворювача є активно-індуктивним: активний опір реалізований за допомогою компоненти «RESISTOR», індуктивний опір реалізований за допомогою компоненти «INDUCTOR». У режимі роботи, результати дослідження якого наведені у поточній публікації, активний опір навантаження дорівнює 50 Ом.

При моделюванні режиму роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача приймалося, що ємність фази конденсаторів комутуючої ланки дорівнює $C = 0.00007$ Ф, а приведена індуктивність фази вторинної обмотки перетворювального трансформатора дорівнює $L_{\gamma} = 0.005$ Гн. Якщо моделюється режим роботи з урахуванням протяжності комутаційного процесу, реактивний опір фази кола змінного струму складає $x_{\gamma} = \omega L_{\gamma} = 314 \cdot 0.005 = 1.57$ Ом. За зазначених числових даних змодельованого робочого режиму, власна частота контуру складає:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_{\gamma}C}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0.005 \cdot 0.00007}} = 975.9 \text{ рад}.$$

Нормоване значення цієї частоти $\omega_{0*} = 975.9 / 314 = 3.1$.

Також урахуємо [3], що базисний струм розраховується як $I_{\phi} = \sqrt{3}E_m / 2x_{\gamma}$, де x_{γ} - індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, приведене до його вторинної обмотки, то його числове значення у моделях трифазного мостового компенсаційного перетворювача складає $I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 100 / 2 \cdot 1.57 = 55.1A$.

Методика дослідження енергетичних характеристик перетворювача полягає у аналізі роздруківки кривих струмів силових електричних вентилів і напруг, отриманих за показниками робочого режиму, що досліджується.

Розглянемо її докладно на прикладі дослідження режиму роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача, коли затримка подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки $\Theta = 1.0$. Роздруківка, необхідних для характеристики цього режиму даних, представлена на рис.3.

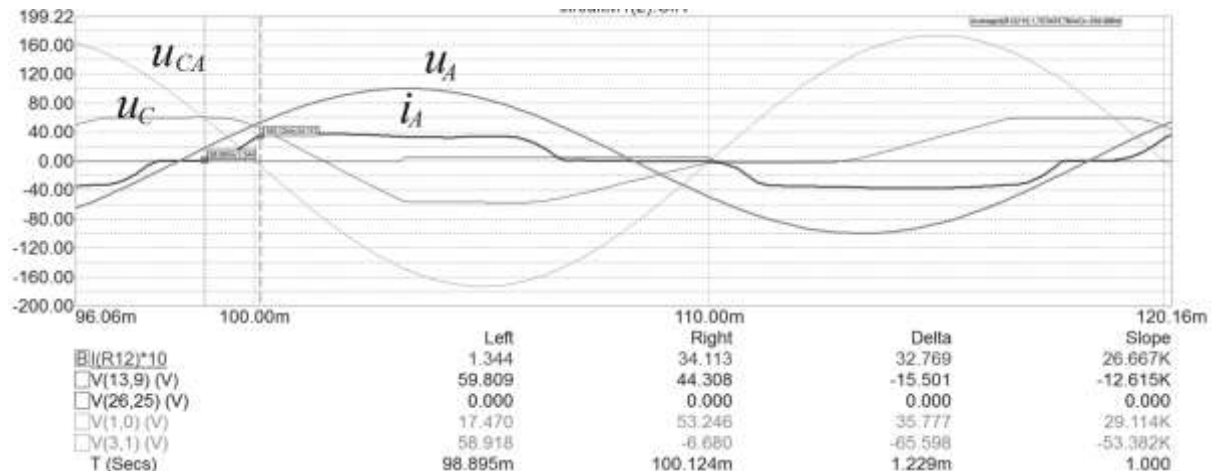


Рисунок 3 – Результати моделювання щодо кутів регулювання і комутації силових електричних вентилів катодної групи ($\Theta = 1.0$)

На рисунку ліва суцільна вертикальна лінія позначає момент початку комутаційного процесу, у який лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівняється з напругою конденсатора.

Числове значення цього моменту – нижній рядок T(Secs) колонки даних під Left. Інші числові дані:

R(12)*10 – величина випрямленого струму (A), помножена на 10;

V(13,9)(V) – величина комутуючої напруги конденсаторів u_C (B);

V(26,25)(V) – імпульс керування транзисторами комутуючої ланки;

V(1,0)(V) – фазна напруга u_A вторинної обмотки трансформатора (B);

V(3,1)(V) – лінійна напруга u_{CA} вторинної обмотки трансформатора.

У кінці комутаційного процесу струм комутації досягає свого максимального значення. Цей момент часу позначений правою пунктирною вертикальною лінією. Числова характеристика моменту знаходиться під Right.

Проаналізуємо дані рис. 3. Початком комутаційного процесу є момент переходу кривої лінійної напруги u_{CA} вторинної обмотки перетворювального трансформатора через нульове значення. По осі абсцис це момент часу Left – 98.895m (98.895 мс). Звернімо увагу, що через цю точку проведена суцільна вертикальна лінія. Через кінцеву точку комутаційного процесу проведена пунктирна вертикальна лінія. По осі абсцис кінцю комутації відповідає момент часу Right – 100.124m (100.124 мс). Різниця часу Delta складає 1.229 мс. Урахувавши, що одній мілісекунді на рисунку відповідають 18° , розрахуємо кут комутації електричних вентилів катодної частини досліджуваного перетворювача: $\gamma = 1.229 \cdot 18 = 22.122^\circ$.

Подібним чином здійснено аналіз результатів схемотехнічного моделювання інших режимів роботи, результати аналітичного розрахунку кутів регулювання та комутації силових електричних вентилів катодної частини перетворювача яких, представлені у табл. 1.

Дані щодо величини кутів комутації та регулювання, отримані в результаті схемотехнічного моделювання восьми режимів роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача, представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Дані за результатами схемотехнічного моделювання

	ω_{0*}	$x_{\gamma*}$	Θ радіани	α градуси	γ градуси
1	3.1	0.058	0.2	3.76	21.46
2	3.1	0.058	0.4	8.20	21.51
3	3.1	0.059	0.6	11.32	21.65
4	3.1	0.060	0.8	15.46	21.84
5	3.1	0.061	1.0	19.89	22.12
6	3.1	0.062	1.2	23.49	22.19
7	3.1	0.062	1.4	27.43	22.68
8	3.1	0.062	1.6	31.14	23.17

Звернімо увагу, що фізичні характеристики робочих режимів, які моделювались у дослідженні, відповідають застосованим у аналітичному розрахунку числових даних робочих режимів.

Зрозуміло, що повного збігу між результатами аналітичного розрахунку, побудованому на результатах дослідження електромагнітних процесів у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі та результатами схемотехнічного моделювання тих же робочих режимів, бути не може. Тож у роботі проведено розрахунок величини розбіжності між результатами зазначених досліджень. Їх результат наведено у табл. 3

Таблиця 3 – Розрахунок величини розбіжності

	ω_{0*}	$x_{\gamma*}$	Θ радіани	$\Delta\alpha$ %	$\Delta\gamma$ %
1	3.1	0.058	0.2	27.69	4.52
2	3.1	0.058	0.4	2.26	4.17
3	3.1	0.059	0.6	4.71	3.88
4	3.1	0.060	0.8	0.38	3.41
5	3.1	0.061	1.0	2.84	3.12
6	3.1	0.062	1.2	0.47	1.51
7	3.1	0.062	1.4	0.92	2.25
8	3.1	0.062	1.6	0.03	3.19

Наведені у табл. 3 дані свідчать про прийнятний рівень розбіжності між результатами аналітичного розрахунку та даними схемотехнічного моделювання.

Висновок. Наведені у публікації дані є підставою для твердження, що у досліджуваному режимі розбіжність між результатами аналітичного розрахунку та схемотехнічного моделювання основних енергетичних характеристик трифазного мостового компенсаційного перетворювача, не перевищує 5%. З цього висновку випадає результат визначення величини кута регулювання шляхом моделювання режиму роботи перетворювача з малою затримкою подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки ($\Theta = 0.2$). Ця обставина пояснюється тим, що при такому робочому режимі комутуюча напруга має мале значення і її форма суттєво відрізняється від теоретичної.

Тож запропонована методика аналізу роботи компенсаційного перетворювача шляхом схемотехнічного моделювання є адекватною і цілком прийнятною.

Список використаної літератури

1. Патент України на корисну модель "Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач": Патент UA № 142864, МПК H02M 3/22, 3/24. / Бойко В.С., - у 2020 01729. Заявл. 12.03.2020. Опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.
2. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu, A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function// 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: 10.1109/APPEEC.2014.7066073, Conference Location.
3. Бойко, В. і Шкардун, О. 2023. Електромагнітні процеси у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі. Технічна електродинаміка. 4 (Чер 2023), 026. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.04.026>.

V. Boiko¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-1018-0642

O. Shkardun¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-7980-8114

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

VERIFICATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF A THREE-PHASE BRIDGE COMPENSATION CONVERTER WITH ONE COMMUTATING LINK

The article considers the issue of reliability of the results of analytical calculation of the feedforward control angle of power electric valves and the commutate angle of a three-phase bridge compensating converter of electric energy with one commutating link. It is noted that the value of these angles determines the capabilities of the converter regarding the generation of reactive energy together with the power supply of the consumer of direct current electric energy. Based on the complexity of the analytical calculation of these characteristics, the issue of verification of the obtained results is relevant, which also confirms the adequacy of the applied research methodology. As a tool for achieving the goal of the work, the authors use circuit simulation in the Micro Cap package. The modeling technique is described in detail, the results of modeling several modes of converter operation are presented, and these results are analyzed. A comparative analysis of the numerical values of the control and commutating angles obtained as a result of analytical calculation and circuit modeling of the same modes of converter operation showed that the discrepancy does not exceed 5%. This indicates the adequacy of the applied modeling technique and the acceptable accuracy of the results of analytical calculations. Refer. 3, fig. 3, table 3.

Keywords: capacitor battery, circuit model, commutating voltage, electric valve, commutating angle, regulation angle.

References

1. Boiko V.S. Three-phase bridge compensation converter: Patent UA for utility model № 142864, 2020. (Ukr).
2. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu, A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function// 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: 10.1109/APPEEC.2014.7066073, Conference Location.
3. Boiko, V. and Shkardun, O. 2023. Conditions for recharging the capacitors of the commutating link of the three-phase bridge compensation converter. Tekhnichna Elektrodynamika. 4 (June 2023),026. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.04.026>.

Надійшла: 04.11.2024

Received: 04.11.2024