

УДК 621.314.26

І.А. КОЗАКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., Р.В. СІЯНКО, асп.  
Криворізький національний університет

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ МОДУЛЬНИМ БАГАТОРІВНЕВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

**Мета** роботи полягає у розробці системи керування мережесимметричним модульним багаторівневим перетворювачем з використанням орієнтації за вектором напруги в мережі та отримання основних аналітичних залежностей, що описують функціонування такої системи.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи аналізу напівпровідникових перетворювачів для аналізу схеми модульного багаторівневого випрямляча, методи координатних перетворень для розділення складових, що впливають на активну та реактивну потужності перетворювача, методи теорії автоматичного керування для синтезу регуляторів струму з використанням внутрішньої моделі.

**Наукова новизна.** Розроблено теоретичні аспекти функціонування системи керування модульним багаторівневим випрямлячем з використанням орієнтації за вектором напруги, що відрізняється від існуючих врахуванням перекресних зв'язків між осями  $d$  та  $q$ , а також налаштуванням параметрів регуляторів струму з використанням внутрішньої моделі.

**Практична значимість.** Представлена система керування може слугувати основою для розробки схемних рішень щодо побудови випрямної частини схем перетворення енергії автоматизованих електроприводів з двигунами, що мають середній рівень номінальної напруги.

**Результати.** Розглянуто можливість використання схеми модульного багаторівневого перетворювача в якості основи для побудови чотириквadrантного електроприводу, де дана схема буде використовуватися як у інверторній, так і у випрямній частинах. Проаналізовано основні властивості системи з орієнтацією за вектором напруги мережі та встановлено, що її використання дозволяє забезпечити роздільне керування величинами активної та реактивної потужностей. Представлено рекомендації щодо налаштування параметрів ПІ-регуляторів струму такої системи.

**Ключові слова:** модульний перетворювач, середній рівень напруги, електропривод, орієнтація за напругою, активна потужність, реактивна потужність

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-90-95

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** В даний час активно розвиваються серійні електроприводи (Siemens SIMOVERT-MV, ABB ACS6000, Alstom VDM6000 Symphony та ін.) на базі багаторівневих перетворювачів [1]. Це пояснюється появою «високовольтних» IGBT-ключів, які здатні витримувати напруги середнього рівня без необхідності послідовного з'єднання декількох транзисторів. Проте, суттєвим недоліком цих перетворювачів є відсутність модульності, а також здатності до збільшення рівня номінальної напруги та / або збільшення кількості рівнів вихідної напруги без суттєвого ускладнення схеми, що певною мірою гальмує подальший розвиток регульованого електроприводу з середнім рівнем номінальної напруги за існуючими напрямками [2]. В той же час, на ринку електропривода присутні пристрої (наприклад, Rockwell Automation PowerFlex 6000), що побудовані на базі багаторівневого перетворювача з послідовно з'єднаними Н-мостами. Такі схеми мають більш широкий діапазон номінальних напруг, що може перевищувати 10 кВ, а також характеризуються високими показниками надійності та відмовостійкості. Ці перетворювачі будуються на базі однотипних низьковольтних комірок, які живляться від ізольованих джерел постійної напруги. Проте, для отримання таких напруг необхідно використовувати трансформатор зі значною кількістю зсунутих за фазою вторинних обмоток, що дозволяє мінімізувати негативний вплив випрямної частини електропривода на якість електричної енергії в мережі. Даний трансформатор є складною за конструкцією електричною машиною та значно збільшує вартість та габаритні розміри такого електропривода.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Використання багаторівневих перетворювачів у системах регульованого електроприводу та системах високовольтної передачі електричної енергії постійним струмом широко розглядається у наукових публікаціях [3-10]. У роботі [6] розглянуто методи балансування напруг всередині плеча, що спрямовані на рівномірний розподіл заряду між модулями в межах одного плеча, оскільки загальний обсяг енергії в кожному плечі інвертора повинен відповідати заданому значенню. Дана робота описує теоретичні основи для незалежного керування енергіями напівплечей перетворювача і представляє узагальнені концепції

керування, що можуть бути застосовані для реалізації таких підходів. Структури систем керування, що запропоновані у роботі, мають на меті мінімізацію струмового навантаження перетворювача, є легкими в реалізації та можуть застосовуватися до широкого класу різновидів модульних багаторівневих перетворювачів. У роботі [7] розглядаються методи мінімізації синфазної напруги мережевого модульного багаторівневого перетворювача. Синфазна напруга, що викликана асиметрією напруги в мережі, зменшується шляхом відповідного керування ключами випрямляча пропорційно до кількості модулів в одному плечі. Проте, у представлених роботах не розглянуто можливості роздільного керування активною та реактивною потужністю випрямляча за рахунок використання орієнтації за вектором напруги мережі.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає у визначенні ключових особливостей використання модульного багаторівневого перетворювача у якості мережевого випрямляча при керуванні з орієнтацією за вектором напруги мережі. Для досягнення поставленої мети було поставлено та розв'язано наступні задачі: розглянуто особливості функціонування модульного багаторівневого перетворювача в режимі підвищувача; аналіз системи керування з орієнтацією за вектором напруги мережі для забезпечення роздільного керування величинами активної та реактивної потужності; розробка рекомендацій щодо налаштування параметрів регуляторів системи автоматичного керування модульним багаторівневим випрямлячем.

**Викладення матеріалу та результати.** З міркувань збереження модульної конструкції силової частини перетворювача логічним кроком є спроба використання схеми модульного багаторівневого перетворювача у структурі електропривода з середнім рівнем номінальної напруги, оскільки в такому випадку буде можливим позбутися багатообмоткового трансформатора, здійснюючи живлення інвертора від спільного ланцюга постійного струму. На ринку електропривода в даний час вже представлено декілька таких систем, наприклад Venshaw M2L 3000, Siemens Sinamics Perfect Harmony GH150, Siemens Simamics SH150. У якості випрамної частини таких перетворювачів застосовуються або некеровані випрямлячі з підвищеною пульсністю, або активні випрямлячі (рис. 1), що дозволяє забезпечити двонаправленість проходження потоку потужності в схемі, а, значить, чотириквadrантну роботу електропривода. Оскільки одним із ключових аспектів впровадження регульованого електропривода для двигунів змінного струму з середнім рівнем номінальної напруги є підвищення енергоефективності, то серед існуючих систем частотного керування доцільно обрати систему векторного керування через те, що вона демонструє більш високі енергетичні показники, ніж системи скалярного керування. Аналогічно до системи векторного керування, у якій здійснюється орієнтація системи координат, що обертається, за вектором потокозчеплення ротора, керування випрямлячем може здійснюватися з орієнтацією за вектором напруги.

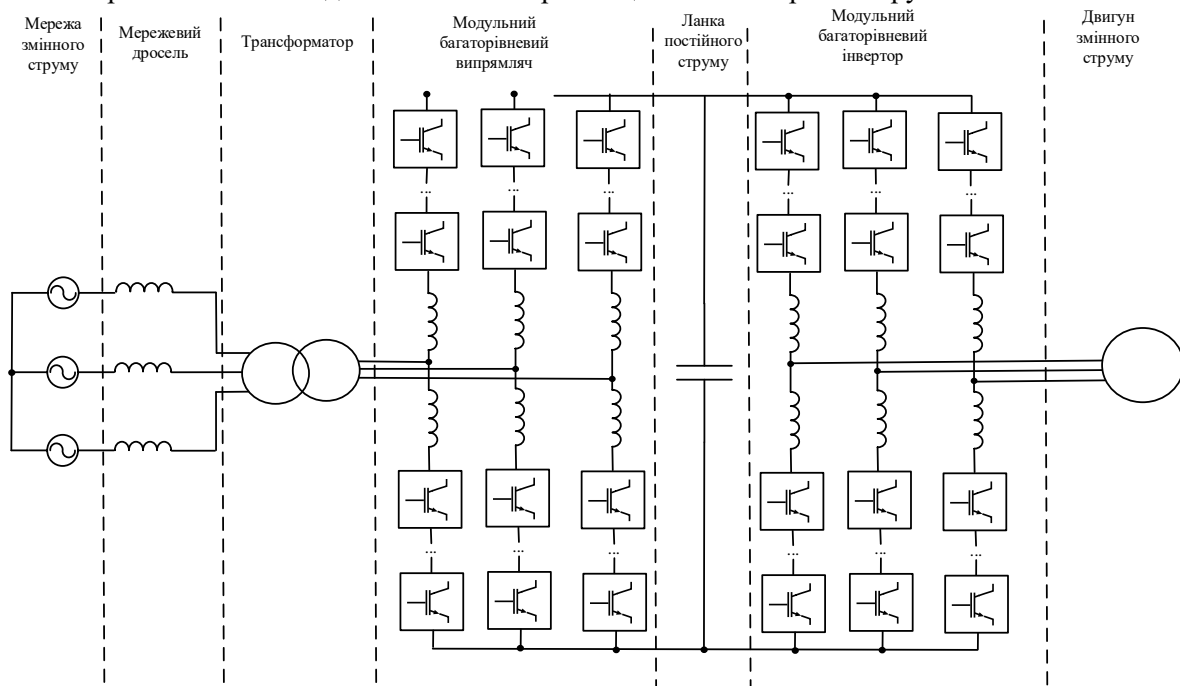
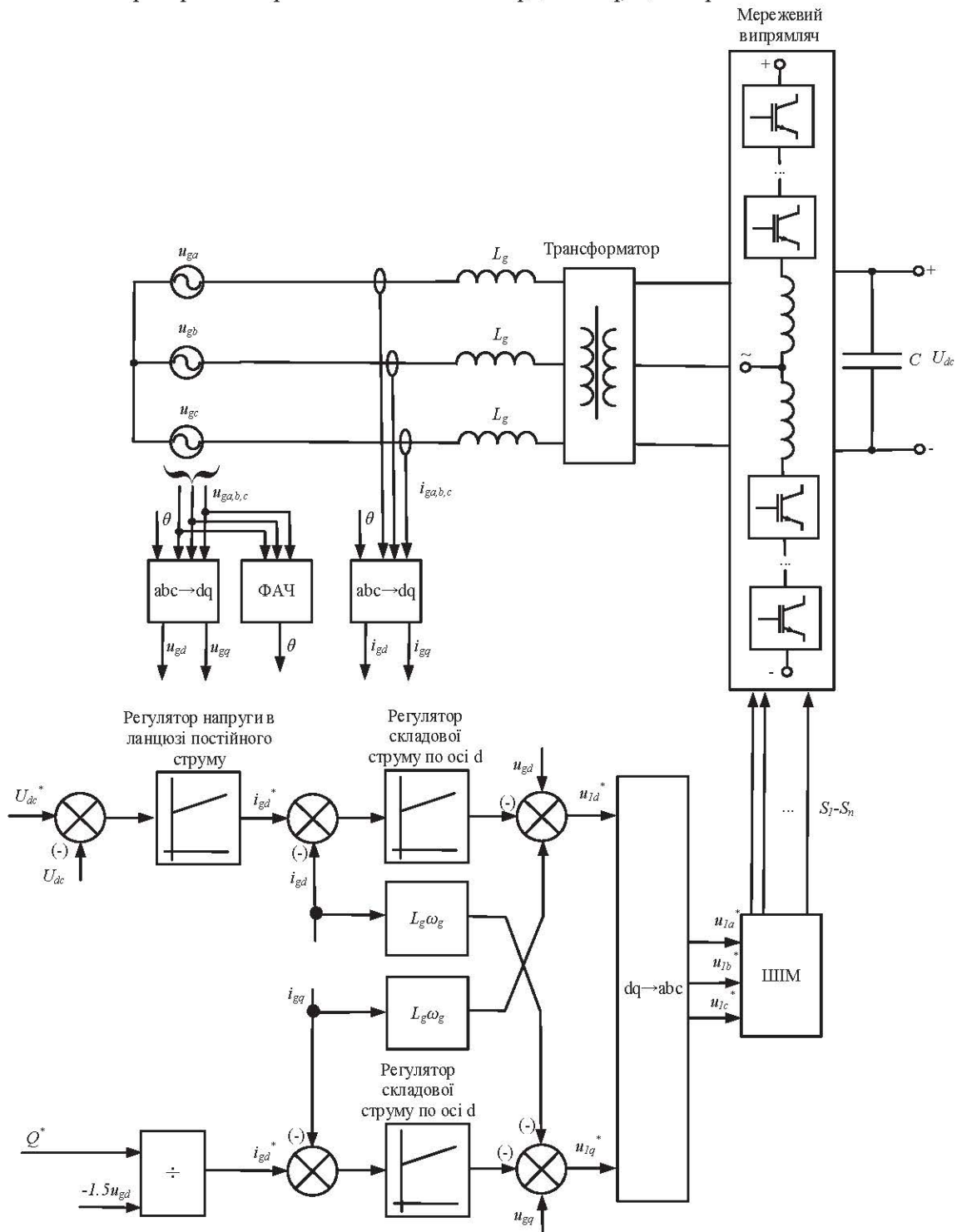


Рис. 1. Структура чотириквadrантного електропривода на базі модульного багаторівневого випрямляча та інвертора

Одним із існуючих підходів до здійснення керування мережевими випрямлячами є система керування з орієнтацією за напругою (рис. 2). Дана система побудована аналогічно до систем векторного керування двигунами змінного струму, де орієнтація здійснюється за вектором потокозчеплення ротора з використанням системи координат dq, що обертається.



**Рис 2.** Структура системи керування випрямною частиною перетворювача енергії у складі електроприводу з реалізацією принципу орієнтації за вектором напруги

На першому етапі роботи системи виміряні напруги мережі ( $u_{ga}$ ,  $u_{gb}$ ,  $u_{gc}$ ) та виміряні струми ( $i_{ga}$ ,  $i_{gb}$ ,  $i_{gc}$ ) перетворюються до двофазної ортогональної системи координат dq, що обертається. У ортогональній системі координат активна та реактивна потужність, що споживаються перетворювачем, можуть бути записані так

$$P = \frac{3}{2}(i_{gd}u_{gd} - i_{gq}u_{gq}); \quad (1)$$

$$Q = \frac{3}{2}(i_{gd}u_{gq} - i_{gq}u_{gd}), \quad (2)$$

де  $i_{gd}$ ,  $i_{gq}$  – проекції вектору мережевого струму на осі системи координат dq,  $u_{gd}$ ,  $u_{gq}$  – проекції вектору напруги мережі на осі системи координат dq.

Рівняння (1) та (2) демонструють, що величини активної та реактивної потужності мають складну взаємозалежність від проекцій векторів напруги та струму мережі на осі системи координат, що обертається.

Проте, дані залежності можуть бути значно спрощені шляхом орієнтації додатного напрямку осі  $d$  за вектором напруги в мережі, як показано на рис. 3. При такому розміщенні векторів відносно системи координат dq, що обертається синхронно з вектором напруги мережі, проекція вектору  $u_g$  на вісь  $q$  стає рівною нулю, тобто  $u_{gq} = 0$ . При цьому проекція вектору  $u_g$  на вісь  $d$  стає постійною величиною, що дорівнює модулю даного вектору, тобто  $u_{gd} = |u_g|$ .

**Рис. 3.** Орієнтація векторів та систем координат мережевого модульного багаторівневого перетворювача

Рівняння активної та реактивної потужності в цьому випадку можуть бути записані так

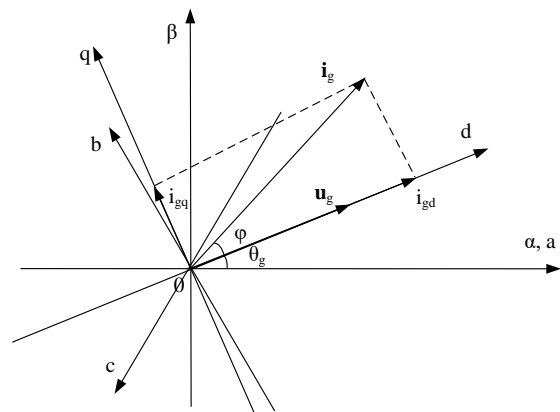
$$P = \frac{3}{2}i_{gd}u_{gd}; \quad (3)$$

$$Q = -\frac{3}{2}i_{gq}u_{gd}. \quad (4)$$

З отриманих рівнянь стає очевидним, що між величиною активної потужності  $P$ , споживаної перетворювачем з мережі, та проекцією мережевого струму на вісь  $d$  існує прямо пропорційна залежність. Аналогічна залежність спостерігається між величиною реактивної потужності  $Q$  та проекцією мережевого струму на вісь  $q$ . Таким чином, даний варіант орієнтації системи координат dq дозволяє розробити двоканальну систему керування мережевим перетворювачем, що здатна забезпечити роздільне керування величинами активної та реактивної потужності.

Для функціонування такої системи необхідно на кожному дискретному інтервалі часу визначити положення вектору напруги мережі, а в подальшому за допомогою блоків фазового автопідлаштування частоти (ФАЧ) визначити кут даного вектору  $\theta_g$ , який є необхідним для функціонування блоків координатних перетворень з нерухомої системи координат abc до системи координат dq, що обертається синхронно з вектором напруги мережі.

За аналогією до системи векторного керування двигунами змінного струму, система керування будується за принципом підлеглого керування, причому внутрішніми контурами є контури керування складовими вектору мережевого струму  $i_{gd}$  та  $i_{gq}$ . Зовнішніми сигналами системи керування з орієнтацією за напругою виступають величини необхідної напруги в ланці постійного струму  $U_{dc}^*$  та реактивної потужності  $Q^*$ , що споживається / віддається в мережу. Вихідними сигналами системи керування є сигнали керування силовими ключами модульного багаторівневого випрямляча. Таким чином, вимірювані трифазні струми мережі  $i_{ga}$ ,  $i_{gb}$  та  $i_{gc}$  з використанням величини кута повороту вектору напруги  $\theta_g$  перетворюються з нерухомої системи відліку abc до системи координат dq, що обертається синхронно з вектором напруги, з відповідними проекціями  $i_{gd}$  та  $i_{gq}$ , що відповідають значенням активного та реактивного струму мережі. Сигнал завдання напруги в ланці постійного струму  $U_{dc}^*$  порівнюється з поточним значенням даної напруги  $U_{dc}$ , а сигнал помилки обробляється регулятором напруги в ланці постійного струму. Вихідним сигналом даного регулятора є сигнал завдання складової струму  $i_{gd}^*$ , який порівнюється з реальним значенням даної складової  $i_{gd}$ , а сигнал помилки обробляється ПІ-регулятором струму по осі  $d$ .



Аналогічним чином побудовано контур керування реактивною потужністю: на основі сигналу завдання реактивної потужності  $Q^*$  розраховується величина струму завдання  $i_{gq}^*$  по осі  $q$  з використанням рівняння (5)

$$i_{gq}^* = -\frac{Q^*}{1.5u_{gd}}. \quad (5)$$

Необхідною умовою роботи такої схеми випрямлення в режимі підвищуючого перетворювача є наявність індуктивних елементів на стороні змінного струму та ємнісних елементів в ланцюзі постійного струму, а тому при складанні рівнянь стану системи необхідно врахувати наявність мережевої індуктивності  $L_g$ . Якщо напругу на клеммах випрямляча зі сторони змінного струму позначити як  $u_{1a}$ ,  $u_{1b}$  та  $u_{1c}$ , то рівняння, записані за другим законом Кірхгофа, для цього кола матимуть вигляд

$$L_g \frac{di_{ga}}{dt} + R_g i_{ga} = u_{ga} - u_{1a}; \quad (6)$$

$$L_g \frac{di_{gb}}{dt} + R_g i_{gb} = u_{gb} - u_{1b}; \quad (7)$$

$$L_g \frac{di_{gc}}{dt} + R_g i_{gc} = u_{gc} - u_{1c}. \quad (8)$$

Перетворимо складові рівнянь (6) – (8) з використанням рівнянь переходу до системи координат  $dq$ , що обертається

$$L_g \frac{di_{g\alpha}}{dt} \cos \theta + R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{g\beta}}{dt} \sin \theta = u_{gd} - u_{1d}; \quad (9)$$

$$-L_g \frac{di_{g\alpha}}{dt} \sin \theta + R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{g\beta}}{dt} \cos \theta = u_{gq} - u_{1q}. \quad (10)$$

Похідні складових струму  $i_{gd}$  та  $i_{gq}$  за часом можуть бути записані так

$$\frac{di_{gd}}{dt} = \frac{1}{L_g} (u_{gd} - u_{1d} - R_g i_{gd} + L_g \omega_g i_{gq}); \quad (11)$$

$$\frac{di_{gq}}{dt} = \frac{1}{L_g} (u_{gq} - u_{1q} - R_g i_{gq} - L_g \omega_g i_{gd}). \quad (12)$$

З наведених рівнянь видно, що існує перехресний зв'язок між процесами, що протікають по осям  $d$  та  $q$  завдяки наявності складових  $L_g \omega_g i_{gq}$  та  $L_g \omega_g i_{gd}$ . Задачею регуляторів складових струму по осям  $d$  та  $q$  є забезпечення мінімальної статичної та динамічної помилки керування відповідними величинами. Вихідним сигналом даних регуляторів є сигнали складових напруг завдання перетворювача по осям  $d$  та  $q$

$$u_{1d}^* = u_{gd} - R_g i_{gd} + L_g \omega_g i_{gq} - \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{p}\right) (i_{gd}^* - i_{gd}); \quad (13)$$

$$u_{1q}^* = u_{gq} - R_g i_{gq} - L_g \omega_g i_{gd} - \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{p}\right) (i_{gq}^* - i_{gq}), \quad (14)$$

де  $k_{p1}$  та  $k_{i1}$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної частин ПІ-регуляторів струму.

Для отримання високих показників якості необхідно знайти аналітичні залежності, що дозволили б розрахувати значення коефіцієнтів ПІ-регуляторів струму. Запишемо рівняння для узагальнених векторів напруги і струму, отримане з використанням перетворення Лапласа

$$U(p) = R_g \cdot I(p) + L_g \cdot I(p) \cdot p. \quad (15)$$

Отже, передатна функція об'єкту керування у контурі струму

$$W_{i-u}(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{1}{pL_g + R_g}. \quad (16)$$

Використаємо регулятор з внутрішньою моделлю (ІМС-регулятор). Синтез таких регуляторів виконується, виходячи з параметрів моделі об'єкту керування та необхідної ширини смуги пропускання контуру керування. В даному випадку передатна функція замкненого контуру струму повинна відповідати аперіодичній ланці першого порядку з частотою зрізу, що дорівнює частоті зрізу контуру

$$W_i(p) = \frac{\omega_i}{p + \omega_i}. \quad (17)$$

Передатна функція ПІ-регулятора струму

$$W_{pc}(p) = k_{pi} + \frac{k_{ii}}{p}. \quad (18)$$

Тоді передатна функція замкненого контуру струму може бути записана так

$$W_{pc}(p) = \frac{\omega_i}{pW_{i-u}(p)} = \frac{\omega_i}{p(R_g + pL_g)} = \omega_i L_g + \frac{\omega_i R_g}{p}. \quad (19)$$

Таким чином, коефіцієнти пропорційної та інтегральної частини ПІ-регулятора струму можна визначити так

$$k_{pi} = \omega_i L_g; \quad (20)$$

$$k_{ii} = \omega_i R_g, \quad (21)$$

де  $\omega_i$  – кутова частота зрізу контуру струму.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Розглянуто схему модульного багаторівневого перетворювача у якості мережевого випрямляча. Для керування ключами модулів схеми використано систему з орієнтацією за вектором мережевої напруги. Дана система дозволяє забезпечити роздільне керування величинами активної та реактивної потужності. Отримано аналітичні залежності, що описують функціонування даної системи. Запропоновано варіант вибору параметрів регуляторів струму системи керування перетворювачем. В якості напрямку подальших досліджень слід виділити створення математичної моделі для всебічного дослідження роботи даної системи керування в умовах зміни керуючих та збурюючих величин.

#### Список літератури

1. Козакевич І.А. Керування потоками потужності гібридних транспортних засобів / І.А. Козакевич, Ю.Г. Осадчук, Р.А. Льченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 124-129.
2. Козакевич І.А. Система енергоефективного керування динамічним компенсатором викривлень напруги / І.А. Козакевич, А.А. Кондратенко // Гірничий вісник. – 2019. – Випуск 105. С. 154-159.
3. Козакевич І.А. Дослідження роботи синхронного двигуна з постійними магнітами в гібридних тягових електроприводах / І.А. Козакевич, І.В. Касаткіна, Л.В. Єрьоменко // Гірничий вісник. – 2018. – Випуск 104. С. 106-110.
4. Козакевич І.А. Система керування вентилями реактивними двигунами / І.А. Козакевич, І.І. Шевченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 135-138.
5. Сінчук І.О. Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізничних підприємств / І.О. Сінчук, І.А. Козакевич, М.Л. Барановська, Т.М. Берідзе, І.І. Пересунько // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2020. – Вип. 50. С. 142-147.
6. Utvić M. Generalized theory on direct arm energy control in modular multilevel converters / M. Utvić, D. Dujčić // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. – 2020. – Vol. 5, iss. 4. – Pp. 388-399.
7. Du S. Common-Mode Voltage Minimization for Grid-Tied Modular Multilevel Converter / S. Du, B. Wu, N. Zargari // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2019. – Vol. 66, iss. 10. – Pp. 7480-7487.
8. Hao Q. Operating region and boundary control of modular multilevel converter station under unbalanced grid conditions / Q. Hao, B. Li, Y. Sun, L. Wu, S. Wang // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2020. – Vol. 35, iss. 3. – Pp. 1146-1157.
9. Hu P. A Currentless Sorting and Selection-Based Capacitor-Voltage-Balancing Method for Modular Multilevel Converters / P. Hu, R. Teodorescu, S. Wang, S. Li, J. M. Guerrero // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – Vol. 34, iss. 2. – Pp. 1022-1025.
10. Wang C. Design and Application of the SFCL in the Modular Multilevel Converter Based DC System / C. Wang, B. Li, J. He, Y. Xin // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2017. – Vol. 27, iss. 4. – Pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2652489>

Рукопис подано до редакції 26.03.2021

УДК 004.896:681.3:621.311

І.А. КОТОВ, канд. техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПІДТРИМКА АВТОМАТИЗАЦІЇ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМОЇ З УРАХУВАННЯМ ІМОВІРНІСНОГО ХАРАКТЕРУ НАВАНТАЖЕННЯ ВУЗЛІВ

**Метою статті** є виклад результатів дослідження з розробки і впровадження методів отримання числових характеристик оперативного керування режимом енергосистеми в аварійних ситуаціях та побудови на цій основі бази знань інтелектуальної системи автоматизації керування. Розглянуті підходи до інтелектуальної підтримки автоматизації прийняття управлінських рішень диспетчерського персоналу енергосистеми. Величини керуючих впливів формуються як елементи матриці чутливості контрольованих параметрів режиму до регульованих навантажень споживачів. В якості додаткового завдання поставлено врахування імовірнісного характеру навантаження вузлів.

**Методи дослідження** полягають у використанні методів теорії імовірності, теорії множин, математичної логіки, теорії автоматів, електроенергетичних систем, теорії графів, математичної статистики. Величини керуючих впливів формуються в результаті планування та реалізації розрахункових експериментів оцінки множини аварійних режимів електричної мережі енергосистеми. Враховано закони розподілу випадкових величин навантажень споживачів.

**Наукова новизна** полягає в новій моделі включення різних форм лінгвістичних знань, представлених єдиною онтологічною моделлю, та числових параметрів чутливості режиму енергосистеми до керуючих дій у інтегровану базу знань, що дозволяє створити побудову ефективних інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень та