

О.О. ЧЕПЕЛЮК, А.В. МИЛАШИЧ

АНАЛІЗ АПАРАТНОГО ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ НАПРУГОЮ ДО 0,66 кВ ВІД ПЕРЕНАВАНТАЖЕНЬ ТА ПЕРЕГРІВУ

Проведено аналіз апаратного захисту асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором напругою до 0,66 кВ від перевантажень та перегріву, реалізованого у відповідності із сучасними стандартами. Розглянуто причини і фактори перегріву двигунів та функціональні особливості вказаних апаратів захисту. Зроблено висновки стосовно ефективності окремих видів захисту двигунів від перевантажень та перегріву і їх поєднання з метою підвищення надійності захисту. Встановлено найбільш перспективні напрямки удосконалення апаратного захисту від перевантаження та перегріву асинхронних двигунів.

Ключові слова: перевантаження, перегрів, реле захисту, розчіплювач, теплове реле, автоматичний відмикач захисту двигунів, електронне реле захисту від перевантажень, термісторне реле захисту, багатофункціональне мікропроцесорне реле захисту.

О.О. СЕРЕЛИУК, А.В. МЫЛАШУЧ

ANALYSIS OF HARDWARE PROTECTION OF SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTORS WITH VOLTAGE UP TO 0.66 kV AGAINST OVERLOADS AND OVERHEATING

An analysis of the hardware protection of asynchronous motors with a short-circuited rotor with a voltage of up to 0,66 kV against overloads and overheating, implemented in accordance with modern standards, was carried out. The causes and factors of engine overheating and the functional features of the specified protection devices are considered. Conclusions were made regarding the effectiveness of certain types of protection against overloads and overheating of engines and their combination in order to increase the reliability of protection. The most promising directions for improvement of hardware protection against overload and overheating of asynchronous motors have been established.

Keywords: overload, overheating, protection relay, disconnecter, thermal relay, automatic motor protection switch, non-electronic overload protection relay, thermistor protection relay, multi-function microprocessor protection relay.

Вступ. Асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором напругою до 0,66 кВ набули широкої популярності в промисловості та побуті, через простоту конструкції та надійність. Для забезпечення безперервної та надійної роботи АД повинні бути дотримані вимоги по номінальним режимам роботи та вжиті заходи, щодо захисту електродвигуна від коротких замикань, перевантажень, перегріву тощо.

Перевантаження та перегрів АД є одними з найчастіших проблем з якими стикаються споживачі під час експлуатації. Перегрів електричних двигунів не завжди пов'язаний з його перевантаженням. Причинами перегріву також можуть бути порушення умов експлуатації (забруднення двигуна чи висока температура навколишнього середовища), вихід з ладу системи охолодження електродвигуна (зламана крильчатка охолодження чи окремі її лопаті) чи вихід з ладу підшипників, що збільшує тертя. У таких випадках традиційні теплові реле (біметалеві чи електронні), які реагують виключно на перевищення струму, не здатні виявляти перегрів та вчасне відключення електродвигуна. Для захисту АД від перегріву існують додаткові апаратні засоби для контролю та захисту АД від підвищеної температури. Комплексний апаратний захист електродвигунів від перевантаження та перегріву суттєво підвищує надійність захисту електродвигунів.

Мета роботи – дослідження та аналіз сучасного апаратного захисту асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором напругою до 0,66 кВ від перенавантажень та перегріву.

Причини та фактори перегріву асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Причин та факторів для перегріву АД можна навести велику кількість, тому зручніше поділити їх на основні групи, а саме: електричні, механічні та ек-

сплуатаційні.

До причин експлуатаційних слід віднести випадки недоцільного використання АД, недостатнє технічне обслуговування та будь-які інші умови роботи, які не відповідають номінальним технічним характеристикам та умовам роботи.

До причин механічних можна віднести фізичний знос та старіння вузлів АД - від ізоляції його обмоток до зносу підшипників, так як підвищене тертя буде сприяти збільшенню струму в обмотках статора і, як результат, підвищенню температури. Також, до цього пункту можна включити механічні дефекти наявних систем охолодження АД, таких як ребра охолодження та вентилятор. Крім того, надмірне механічне навантаження двигуна чи його заклинювання внаслідок поломки його механічної навантаги також спричиняють збільшення струмів в обмотках двигуна, наслідком чого є їх перегрів та вихід із ладу.

До причин електричних належать більш кількісні показники, такі як: напруга, струм, частота, температура навколишнього середовища та в середині статора. Вихід за номінальні значення хоча б одного з них потягне за собою збій у роботі АД.

Для забезпечення номінальних температурних режимів роботи АД необхідні комплексні заходи, які мають включати в себе: вибір асинхронного двигуна з відповідними характеристиками, вибір базового релейного захисту двигуна від коротких замикань, перенапруг або недостатньої напруги, захисту від перенавантажень та перегріву і дотриманням достатнього рівня технічного обслуговування та заявленим умовам роботи.

Актуальні міжнародні стандарти стосовно апаратного захисту АД від перевантажень та перегріву. На сьогоднішній день стосовно влаштування захисту АД від перевантажень та перегріву діють наступні

© О.О. Чепелюк, А.В. Милашич, 2024

стандарти.

1) IEC 60947-4-1:2023 Low-voltage switchgear and controlgear – Part 4-1: Contactors and motor-starters – Electromechanical contactors and motor-starters [1].

Вказаний стандарт поширюється на контактори постійного і змінного струмів та пускачі і пов'язані з ними пристрої (апарати) захисту від перевантажень (вбудованого виконання – розчіплювачі та окремо стоячі чи комбіновані з контакторами або пускачами – реле) і (чи) короткого замикання. Стосовно захисту електродвигунів від перевантажень у цьому стандарті регламентуються методи захисту електричних двигунів від перевантаження, вимоги стосовно реле перевантаження електродвигунів, устрою миттєвого спрацьовування захисту двигунів та інше. Стандартом встановлені класи розчеплення реле (розчіплювачів) захисту від перевантаження (2, 3, 5, 10А, 10, 20, 30, 40), кожному з яких відповідає окрема часо-струмова захисна характеристика з відповідними допусками.

Стандарт поширюється на наступні апарати захисту від перевантажень АД:

– електромеханічні теплові реле захисту від перевантажень (з компенсованим та не компенсованим впливом температури навколишнього середовища в діапазоні від -5 до $+40$ °С, чутливих і не чутливих до випадіння фази);

– електромагнітні реле захисту від перевантажень з затримкою та без затримки часу спрацювання;

– напівпровідникові (електронні) реле захисту від перевантажень зі стандартними та розширеними (контроль асиметрії напруги та струму, чергування фаз, рівня напруги, частоти) функціями захисту.

2) IEC 60034-11:2020 Rotating electrical machines – Part 11: Thermal protection [2].

Цей стандарт визначає вимоги, що стосуються термозахисних пристроїв (апаратів) та термодатчиків, вбудованих в обмотки статора чи розміщених в інших підходящих місцях в АД з метою його захисту від пошкоджень внаслідок теплових перевантажень. Він застосовується до одношвидкісних трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором напругою до 1000В. Стандарт регламентує тепловий захист АД при повільній та швидкій зміні температури, встановлює максимально допустимі температури для класів нагрівостійкості обмоток 130(В), 155(F), 180(Н) та 200(N).

Також у цьому стандарті наведені типові методики дослідження теплових перевантажень АД та відповідних захисних пристроїв.

Типи апаратного захисту.

Теплове (електротеплове) реле є електромеханічним апаратом захисту, що складається з контактної системи (NC чи NC+NO контактів), керованої біметалевими пластинами (одна – у однофазних реле, три – у трифазних реле), що нагріваються струмами окремих фаз. Коли температура пластини досягає заданого порогу, теплове реле вимикає живлення двигуна шляхом знеструмлення обмотки приводного електромагніта контактора чи магнітного пускача.

Спосіб нагріву біметалевої пластини (прямий – струм двигуна протікає по пластині, не прямий – за

допомогою нагрівального елемента, що нагріває пластину чи комбінований – поєднує перші два способи) залежить від величини струму реле.

Для того щоб швидкість спрацьовування контактів такого реле не залежала від швидкості руху вільного кінця біметалевої пластини (вона, у свою чергу, залежить від величини струмів перевантаження) між ними встановлено, так званий, проміжний елемент, що складається з системи важелів.

У конструкціях таких реле передбачена можливість регулювання уставки реле (номінативного струму електродвигуна) у певному діапазоні. Зазвичай, у кожній серії сучасних реле верхня границя струму одного виконання реле є нижньою границею наступного. Сучасні виробники виготовляють такі реле з номінативним струмом від десятих долей до сотень Ампер. Клас розчеплення реле – 10 (10А).

Практично у всіх сучасних серіях цих реле є можливість вмикання чи відмикання функції самоперевірки після спрацьовування реле та функція тестування реле. Також у сучасних теплових реле в діапазоні температур навколишнього середовища від -5 до $+40$ °С конструктивно реалізована температурна компенсація, що забезпечує стабільність захисних характеристик у вказаному діапазоні температур.

Для уникнення несанкціонованої зміни налаштування уставки реле у сучасних серіях реле багатьма виробниками встановлюються захисні кришки з прозорих пластмас з можливістю їх опломбування.

Конструкції реле передбачають можливість їх встановлення безпосередньо на контакторах (магнітних пускачах) відповідних серій чи окремо – на спеціальному адаптері. Спосіб кріплення адаптера – на панель чи (та) на DIN-рейку.

На рис.1 показано приклади загального вигляду таких реле [3, 4].



Рис. 1. Приклади сучасних трифазних теплових (біметалевих) реле

Принцип дії теплового реле з біметалевою пластинною заснований на законі Джоуля-Ленца, тобто для моніторингу ступеня перенавантаження, використовується теплова енергія, яка утворюється в результаті

протікання струму по біметалевим пластинам чи (та) нагрівальним елементам реле [5, 6].

До переваг таких реле можна віднести простоту конструкції та її відносну дешевизну, до недоліків - відсутність можливості точного регулювання температури спрацьовування, оскільки їх регулювання можливе лише за струмом. Також суттєвим недоліком таких реле є залежність часу спрацьовування реле від температури навколишнього середовища в місці його встановлення (у реле без температурної компенсації). У разі коли температура навколишнього середовища двигуна відрізняється від температури навколишнього середовища в місці встановлення реле – можливе хибне спрацьовування чи неспрацьовування реле (при неврахуванні цієї обставини при налаштуванні реле).

Автоматичний відмикач захисту двигунів (Motor-protective circuit-breaker) являє собою спеціалізований відмикач з регульованим захистом від струмів перевантаження АД класом розчіплення 10 (10А) та фіксованим захистом від струмів короткого замикання [7]. Захист від струмів короткого замикання забезпечується електромагнітними розчіплювачами, захист від струмів перевантажень – тепловими біметалевими розчіплювачами, будова та принцип дії яких аналогічний розглянутим вище тепловим реле. У відмикачі біметалева пластина при нагріванні вивільняє зачіпку механізму вільного розчіплення відмикача, що приводить до розмикання його головних контактів та знеструмлення електродвигуна. Діапазон струмів уставки таких відмикачів такий же як і у теплових реле. У сучасних відмикачах реалізована температурна компенсація в діапазоні температур навколишнього середовища від -5 до $+40$ °С. Для сигналізації спрацьовування відмикача додатково можуть встановлюватися блоки допоміжних контактів з NC та NO контактами.



Рис. 2. Приклад автоматичного відмикача захисту двигуна [7]

Такий апарат захисту є вдалим поєднанням мінімально необхідних захисних функцій, які необхідні для безпечної роботи електродвигуна.

Електронні реле захисту від струмів перевантажень за способом технічної реалізації можуть бути цифровими (мікропроцесорними) чи аналоговими, містять у собі датчики струму (вимірювальні трансформатори струму (найчастіше), пояси Роговського, струмові шунти), що контролюють струми окремих фаз. В залежності від величини струмів, вимірювальні трансформатори струму можуть бути вбудова-

ними у конструкцію реле чи виносними. Вихідним комутаційним елементом у таких реле є вбудоване електромагнітне реле, яке спрацьовує при досягненні порогів спрацювання. У таких реле точність регулювання та вимірювання струмів перевантаження значно вища у порівнянні з тепловими біметалевими реле. Разом з тим їх вартість також значно вища.

На сьогоднішній день на актуальному ринку переважають електронні мікропроцесорні реле захисту. Такі реле можуть мати ще й розширені можливості по налаштуванням, так як завдяки використанню мікропроцесорного способу керування, є змога задавати не тільки більш точно струм спрацювання, а ще й такі характеристики як наприклад: клас розчіплення, затримку на відмикання, та деякі виробники надають можливість автоматичного повторного вмикання (АПВ) тощо. Індикація стану у цих реле може здійснюватися за допомогою світлодіодів чи цифрових екранів, на які виводиться поточне значення струму. Цифрові екрани можуть бути вбудованими в конструкцію реле чи виносними – для встановлення на панелях. Реле оснащені цифровими екранами зазвичай мають функцію пам'яті (зберігаються причини спрацьовування, значення струмів, що спричинили спрацьовування реле та час виникнення аварійної ситуації). Способи кріплення таких реле – безпосередньо на контакторах (магнітних пускачах) чи окремо – на панель чи (та) на DIN-рейку.

На рис. 3-5 показано приклади загального вигляду таких реле [8].

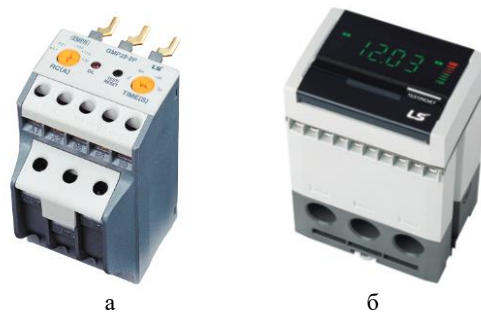


Рис. 3. Приклади електронних реле захисту АД з світлодіодною індикацією стану (а) та з вбудованим цифровим екраном (б)



Рис. 4. Приклад електронного реле захисту АД з виносним цифровим екраном



Рис. 5. Приклад електронного реле захисту від струмів перевантажень трифазних АД з виносними трансформаторами струму [8]

Термісторні реле захисту АД забезпечують захист АД від недопустимих перевищень температури його обмоток, у які попередньо мають бути встановлені відповідні температурні датчики (термістори). Такі реле є ефективним доповненням до апаратів захисту від перевантажень, оскільки останні не завжди виявляються ефективними.

Конструктивно ці реле бувають аналоговими та цифровими (мікропроцесорними). Вихідним елементом такого реле є вбудоване у нього електромагнітне реле, яке сигналізує про перевищення температури при досягненні порогового значення температури обмотки. Вхідним елементом такого реле є термістори РТС чи NTC типів, які мають бути встановленими у кожну обмотку електродвигуна під час його виготовлення.

Розташовані у обмотках електродвигуна термістори з'єднуються послідовно – рис. 6, або паралельно, термінали термісторів виводяться у клемну коробку АД. Схема підключення термісторного реле для захисту АД наведена на рис. 7.

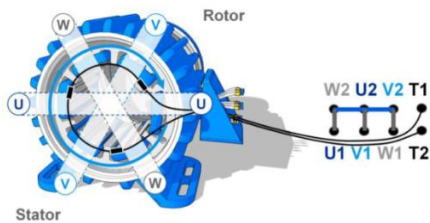


Рис. 6. Розташування термісторів у АД

Аналогові термісторні реле, як правило, не мають можливості налаштувань порогів спрацьовування, виготовляються під конкретні типи термісторів з відомою схемою їх з'єднання. Фактично – ці реле виготовляються під конкретну серію АД конкретного виробника, що суттєво обмежує їх більш широке використання (з двигунами інших серій інших виробників).

Цифрові (мікропроцесорні) термісторні реле захисту можуть бути виготовлені під конкретні типи двигунів (так як і аналогові), а можуть бути більш універсальними – з можливістю налаштувань порогів спрацьовування, що значно розширює їх область застосування. Використання мікроконтролерів у таких реле дозволяє також реалізовувати в них не лише захист

від перегріву шляхом видачі сигналу на відключення АД, але й сигналізацію (попередження) про нетипове зростання температури (дозволяє виявляти випадки забруднень АД, що порушують розсіювання тепла у навколишнє середовище чи порушення роботи системи його охолодження) для своєчасного вжиття відповідних заходів без аварійного відключення двигуна (без аварійної зупинки технологічного процесу).

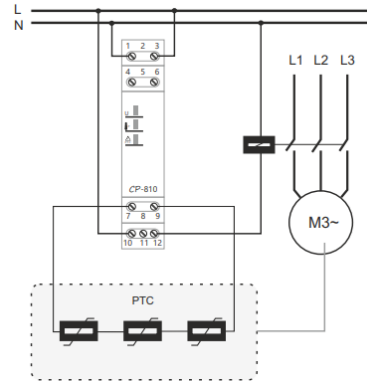


Рис. 7. Схема захисту трифазного АД від перегріву за допомогою термісторного реле

Багатофункціональні мікропроцесорні реле захисту використовують для забезпечення комплексного захисту АД. Такі реле є найбільш універсальними апаратами захисту – можуть контролювати основні електричні параметри АД (струм, напругу, частоту) та мати додаткові функції, до яких можна віднести: логування електричних параметрів, підрахунок споживаної потужності, інтеграція в системи бездротового зв'язку тощо [9]. Також вони дозволяють запровадити системи контролю температури зі зворотнім зв'язком за рахунок датчиків, які можна приєднати до таких пристроїв, через що збільшується ефективність захисту двигуна від перегріву. Найчастіше такі реле виготовляються з можливістю контролю температури нагріву обмоток двигуна чи підшипників за допомогою резистивних датчиків температури (переважно РТ100 та РТ 1000).

Приклад конструкції такого реле зі встановленням на DIN-рейку наведено на рис. 8 [9].

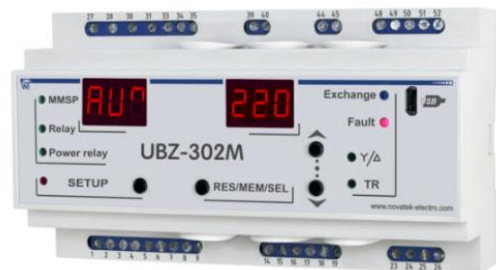


Рис. 8. Багатофункціональне мікропроцесорне реле захисту АД

Характерною особливістю таких реле є їх досить висока вартість, що обмежує їх широке застосування для захисту електродвигунів невеликої потужності.

Висновки.

1. На основі аналізу причин та факторів, що спри-

чиняють перегрів обмоток АД встановлено, що у ряді випадків, апаратний захист АД від перевантаження не забезпечує захист АД від перегріву, спричиненого рядом експлуатаційних та механічних факторів.

2. Найбільш перспективним напрямком розвитку апаратного захисту від перевантаження та перегріву АД є подальше удосконалення та розробка відповідних мікропроцесорних реле захисту. Напрямами удосконалення таких реле можуть бути удосконалення математичних моделей реле та алгоритмів їх роботи з подальшою комп'ютерною симуляцією їх роботи та практичною реалізацією у натурних зразках з подальшим впровадженням у виробництво.

3. З метою зменшення сумарної вартості захисту АД від перевантажень та перегріву доцільно поєднувати ці види захисту в одній конструкції мікропроцесорного реле захисту з можливістю налаштувань як струмів перевантаження для різних класів розчеплення за [1] так і перегріву у відповідності зі стандартними класами нагрівостійкості обмоток АД [2].

Список літератури

- 1 IEC 60947-4-1:2023 *Low-voltage switchgear and controlgear – Part 4-1: Contactors and motor-starters – Electromechanical contactors and motor-starters* [Електронний ресурс]. <https://webstore.iec.ch/publication/74487> (дата звернення 10.02.2024).
- 2 IEC 60034-11:2020 *Rotating electrical machines – Part 11: Thermal protection* [Електронний ресурс]. <https://webstore.iec.ch/publication/64293> (дата звернення 01.02.2024).
- 3 Теплові реле серії РТ [Електронний ресурс]. <https://www.acko.ua/upload/uf/9b5/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5%20%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%96%D1%97%20%D0%A0%D0%A2.pdf> (дата звернення 12.10.2023р.).
- 4 Теплові реле ЕТІ [Електронний ресурс]. <https://eltron.com.ua/download/catalogs/eti/eticon/re.pdf> (дата звернення 20.10.2023).
- 5 Клименко Б. В. *Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навч. посібник*. Харків : Точка, 2012. 340 с.
- 6 Як влаштовано і працює теплове реле? [Електронний ресурс]. https://beregbud.com.ua/yak-vlashtovano-i-pracyuye-teplove-rele/#google_vignette (дата звернення 01.11.2023).

- 7 PKZ motor protection circuit breaker [Електронний ресурс]. <https://www.eaton.com/gb/en-gb/catalog/industrial-control--drives--automation---sensors/pkz-motor-protective-circuit-breaker.html#tab-3> (дата звернення 16.11.2023).
- 8 Contactor & Overload Relay [Електронний ресурс]. https://www.ls-electric.com/products/category/Smart_Power_Solution/Low_Voltage/Contactor_&_Overload_Relay (дата звернення 20.11.2023).
- 9 Універсальний блок захисту УБЗ-302М [Електронний ресурс]. <https://novatek-electro.com/ru/shop/gotovye-resheniya-dlya-promyshlennoy-avt/profesiyniy-zakhist-trifaznogo-promi/universalnyy-blok-zashhity-ubz-302m.html> (дата звернення 30.11.2023).

References (transliterated)

- 1 IEC 60947-4-1:2023 *Low-voltage switchgear and control-gear – Part 4-1: Contactors and motor-starters – Electromechanical contactors and motor-starters* [Elektronnyi resurs]. <https://webstore.iec.ch/publication/74487> (data zvernennia 10.02.2024).
- 2 IEC 60034-11:2020 *Rotating electrical machines – Part 11: Thermal protection* [Elektronnyi resurs]. <https://webstore.iec.ch/publication/64293> (data zvernennia 01.02.2024).
- 3 Teplovi rele serii RT [Elektronnyi resurs]. <https://www.acko.ua/upload/uf/9b5/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5%20%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%96%D1%97%20%D0%A0%D0%A2.pdf> (da-ta zvernennia 12.10.2023).
- 4 Teplovi rele ETI [Elektronnyi resurs]. <https://eltron.com.ua/download/catalogs/eti/eticon/re.pdf> (data zvernennia 20.10.2023r.).
- 5 Klymenko B. V. *Elektrychni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahalnyi kurs: navch. posibnyk*. Kharkiv : Tochka, 2012. 340 p.
- 6 Yak vlashtovano i pratsiue teplove rele? [Elektronnyi resurs]. https://beregbud.com.ua/yak-vlashtovano-i-pracyuye-teplove-rele/#google_vignette (data zvernennia 01.11.2023).
- 7 PKZ motor protection circuit breaker [Elektronnyi resurs]. <https://www.eaton.com/gb/en-gb/catalog/industrial-control--drives--automation---sensors/pkz-motor-protective-circuit-breaker.html#tab-3> (data zvernennia 16.11.2023).
- 8 Contactor & Overload Relay [Elektronnyi resurs]. https://www.ls-electric.com/products/category/Smart_Power_Solution/Low_Voltage/Contactor_&_Overload_Relay (data zvernennia 20.11.2023).
- 9 Universalnyi blok zakhystu UBZ-302M [Elektronnyi resurs]. <https://novatek-electro.com/ru/shop/gotovye-resheniya-dlya-promyshlennoy-avt/profesiyniy-zakhist-trifaznogo-promi/universalnyy-blok-zashhity-ubz-302m.html> (data zvernennia 30.11.2023).

Надійшла (received) 01.05.2024

Відомості про авторів / About the authors

Чепелик Олександр Олександрович (Chepeliuk Oleksandr Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: chep1@i.ua.

Милашич Андрій Володимирович (Mylashych Andrii Vlodumyrovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: mr.milashich@gmail.com.