

О.О. ЧЕПЕЛЮК, А.В. МИЛАШИЧ

ОСОБЛИВОСТІ ТЕРМІСТОРНОГО ЗАХИСТУ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ НАПРУГОЮ ДО 0,66 кВ

У статті проаналізовані особливості термісторного захисту від перегріву трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором напругою до 0,66 кВ. Проведено порівняльний аналіз різних типів та видів термісторів, зокрема їх конструктивних особливостей, принципів роботи та характеристик, що забезпечує ефективний захист обмоток двигуна від критичного перегріву. Визначено переваги та недоліки різних видів термісторного захисту асинхронних двигунів, що дозволяє обґрунтовано вибрати оптимальний варіант захисту залежно від умов експлуатації та вимог до надійності електродвигунів у відповідності з сучасними міжнародними стандартами.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, перегрів, термісторний захист, термістор, РТС-термістор, NTC-термістор, термісторне реле захисту.

О.О. СЕРЕЛИУК, А.В. МЫЛАШУЧ

FEATURES OF THERMISTOR PROTECTION OF THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTORS WITH SHORT-CIRCUIT ROTOR WITH VOLTAGE UP TO 0.66 kV

The article analyzes the features of thermistor protection against overheating of three-phase asynchronous motors with a squirrel-cage rotor with a voltage of up to 0.66 kV. A comparative analysis of different types and types of thermistors is carried out, in particular their design features, operating principles and characteristics, which provides effective protection of motor windings from critical overheating. The advantages and disadvantages of different types of thermistor protection of asynchronous motors are determined, which allows you to reasonably choose the optimal protection option depending on the operating conditions and requirements for the reliability of electric motors in accordance with modern standards.

Keywords: asynchronous electric motor, overheating, thermistor protection, thermistor, PTC thermistor, NTC thermistor, thermistor protection relay.

Вступ. Термісторний захист асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором напругою до 0,66 кВ є важливим аспектом сучасних систем управління та безпеки електричних машин. В умовах зростаючої складності виробничих процесів і підвищення вимог до надійності обладнання, проблема захисту асинхронних електродвигунів від перегріву стає все більш актуальною.

Асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором широко застосовуються в промисловості, побутовій техніці та інших галузях, де їх надійна робота є ключовим фактором для безперервності технологічних процесів. Перегрів є однією з основних причин виходу з ладу електродвигунів, що може призвести до значних фінансових втрат, простоїв виробництва та підвищеного ризику аварійних ситуацій.

Застосування термісторів як елементів захисту забезпечує ефективний контроль температури обмоток двигуна, попереджаючи критичне перегрівання. Термістори, завдяки своїй високій чутливості до змін температури, дозволяють вчасно виявити небезпечне підвищення температури і запобігти можливим негативним наслідкам, таким як руйнування ізоляції, скорочення терміну служби двигуна або навіть повна його відмова. Впровадження термісторного захисту є відносно простим рішенням, яке не вимагає значних фінансових витрат, що робить його доступним для широкого кола користувачів. Незважаючи на певні обмеження, такі як чутливість до зовнішніх умов і необхідність додаткової електроніки для реалізації повноцінної системи захисту, термісторний захист залишається одним із найефективніших і найбільш економічно вигідних методів захисту електродвигунів від перегріву. Термісторний захист АД ефективний для двигунів з тривалим періодом запуску, частими операціями включення та відключення (повторно-короткочасний режим роботи) та двигунів з

регульованим числом обертів (за допомогою перетворювачів частоти). Цей вид захисту також ефективний при сильному забрудненні двигунів або виході з ладу системи примусового охолодження [1]. Враховуючи важливість надійного функціонування електродвигунів у сучасному виробництві, термісторний захист є актуальним і виправданим рішенням, що забезпечує довговічність та стабільність роботи обладнання.

Мета роботи аналіз актуального термісторного захисту трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором напругою до 0,66 кВ.

Термістори, як датчики температури [2-4]. Термістор – різновид напівпровідникового резистора, опір якого залежить від температури навколишнього середовища. Через свої невеликі розміри, та залежності опору від температури, даний тип резисторів добре зарекомендував себе в якості датчика температури.

В залежності від матеріалу, з якого виготовлений термістор, його опір при зростанні температури може зменшуватись або збільшуватись, відповідно такі термістори мають або негативний температурний коефіцієнт NTC (їх називають NTC-термістори чи NTC-резистори), або позитивний температурний коефіцієнт – РТС (їх називають РТС-термістори або РТС-резистори чи позистори).

РТС-термістори поділяються на дві групи залежно від використовуваних матеріалів, їх структури та процесу виготовлення.

Першу групу часто називають Silistors - у них в якості напівпровідникового матеріалу використовується кремній. Зазвичай вони використовуються як датчики для вимірювання температури через їх лінійну залежність опору від температури – рис. 1.

Друга група - РТС-термістори перемикаючого типу (switching type) виготовляються на основі полікристалічних керамічних матеріалів та мають нелінійну

© О.О. Чепелюк, А.В. Милашич, 2024

залежність опору від температури – рис. 1.

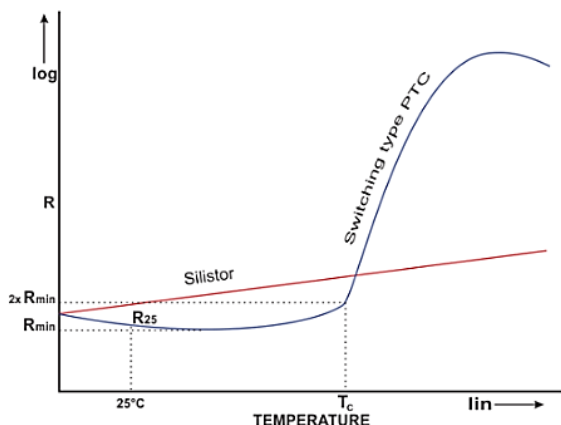


Рис. 1. Залежність опору PTC-термісторів від температури [2]

Як видно з рис. 1, PTC-термістори перемикаючого типу мають незначний негативний температурний коефіцієнт аж до точки мінімального опору – R_{\min} . Вище цієї точки температурний коефіцієнт стає позитивним, проте досить незначним до моменту досягнення своєї перехідної температури (T_c). Цю температуру також іноді називають температурою перемикавання або температурою Кюрі. Температура перемикавання - це температура, при якій опір PTC-термісторів комутуючого типу починає швидко зростати. Температура Кюрі в більшості випадків визначається як температура, при якій опір вдвічі перевищує значення мінімального опору. Зазвичай, коли температура піднімається вище точки Кюрі - опір позистора збільшується зі швидкістю від 15% до 60% на градус Цельсія.

Мінімальний опір PTC-термістора (R_{\min}) – це найменший опір, який можна виміряти на PTC-термісторі перемикаючого типу, як видно на залежності опору від температури на рис. 1. Це точка на кривій, після якої температурний коефіцієнт стає позитивним. Номінальний опір (R_{25}) зазвичай визначається як опір при 25 °C і служить для класифікації PTC-термісторів за значенням їх опору. Він вимірюється низьким струмом, який не нагріває термістор настільки, щоб вплинути на вимірювання.

Для вимірювання (контролю) температури PTC-термістори застосовуються у режимі датчика температури (нульової потужності). У такому режимі роботи споживана потужність термістора настільки мала, що надає незначний вплив на температуру термістора і, отже, і на опір, на відміну від режиму самонагрівання.

Як будь який елемент електромеханічної системи PTC-термістор має свої переваги та недоліки. До переваг можна віднести: компактні розміри, низьку ціну, наявність декількох типів з різними характеристиками. До недоліків зазвичай відносять низьку чутливість та менший температурний діапазон, в порівнянні з NTC-термісторами, та наявність ефекту саморозігріву.

NTC-термістори зазвичай виготовляють з оксидів нікелю, кобальту титану та заліза. Цей тип термісторів має більш широкий температурний діапазон, у порівнянні з PTC-термісторами, та має більш високу точність

контролю температури. Коефіцієнт температурної чутливості приблизно в п'ять разів більше, ніж у кремнієвих датчиків температури (Silistors) і приблизно у десять разів більше, ніж у резистивних датчиків температури (RTD) типу PT100. NTC-термістори зазвичай використовуються в діапазоні від -55 до +200 °C [3].

На рис. 2 для порівняння наведені залежності опору від температури одного із типів NTC-термісторів та RTD типу PT100.

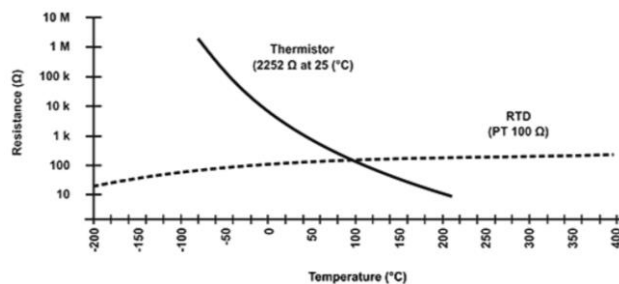


Рис. 2. Залежність опору NTC-термістора та RTD PT100 від температури [3]

Як видно з рис. 2, NTC-термістори мають набагато крутіший нахил залежності опору від температури в порівнянні з RTD, що свідчить про кращу температурну чутливість NTC-термісторів. Разом з тим RTD мають набагато ширший діапазон вимірюваних температур та більш високу точність. Точність NTC-термісторів співставна з точністю термопар.

Нелінійність залежності між опором і температурою, яку демонструють NTC-термістори, становить велику проблему при використанні аналогових схем для точного вимірювання температури. Однак застосування цифрових схем вирішує цю проблему за рахунок можливості обчислення точних значень шляхом інтерполяції табличних залежностей опору від температури або шляхом вирішення рівнянь, які апроксимують типову криву NTC-термістора.

У порівнянні з RTD, NTC-термістори мають менші розміри, більшу стійкість до ударів і вібрації при меншій вартості.

Із суттєвих недоліків NTC-термісторів можна відзначити ефект самонагрівання, який може суттєво впливати на результати вимірювання. Для вимірювання (контролю) температури PTC-термістори застосовуються у режимі датчика температури (нульової потужності) - щоб струм через нього підтримувався якомога нижчим для уникнення самонагрівання.

Термістори всіх різновидів виготовляються у багатьох формфакторах, в залежності від їх призначення та застосування, наприклад, термістори дискові, як правило, використовуються на друкованих платах, а термістори «бісерного» типу (рис. 3) використовуються для контролю температури в асинхронних електродвигунах з короткозамкненим ротором.

Загалом термістори, як NTC так і PTC, добре підходять для контролю температури в АД, будь то температура обмоток чи підшипників.



Рис. 3. Термістори

Їх недоліки можна компенсувати, наприклад, за рахунок мікропроцесорного керування, а їх переваги суттєві, адже малі габаритні розміри разом з малою вартістю, достатніми точністю вимірювання та температурними діапазонами, дають можливість якісно та надійно захистити електродвигун від перегріву.

Особливості застосування термісторів для температурного захисту асинхронних двигунів. Термісторний захист має дві складові - апаратну (застосування спеціалізованих реле термісторного захисту) та конструктивну (інтеграція термісторів у конструкцію асинхронного електродвигуна) [1].

Конструктивно електродвигун з термісторами не зазнає значних конструктивних змін, термістори вкладаються в пази між статором та обмоткою, або в середині обмотки, між витками чи в лобовій частині обмотки зі сторони протилежної вентилятору зовнішнього охолодження. Термісторні ланцюги можуть складатися з одного або декількох (найчастіше 1, 3, 6) термісторів. Зазвичай термісторний захист одношвидкісних трифазних АД з короткозамкненим ротором реалізується за допомогою трьох термісторів, вбудованих у кожен з обмоток.

Розташовані у обмотках трифазного електродвигуна термістори з'єднуються послідовно (рис. 4), або паралельно, термінали термісторних ланцюгів виводяться у клемну коробку АД. На рис. 5 показано фрагмент трифазного АД зі встановленими у лобовій частині обмоток термісторами.

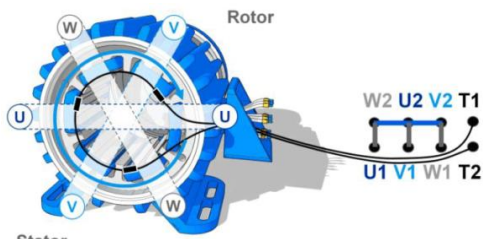


Рис. 4. Конструктивна модель трифазного АД з PTC-термісторами

Тип з'єднання термісторів залежить від їх характеристик, для (switching type) застосовують послідовне з'єднання (рис. 6, а), а для NTC-термісторів - паралельне (рис. 6, б). Це дозволяє більш ефективно та завчасно визначити стан перегріву обмоток двигуна, адже перегрів навіть одного з термісторів (однієї обмотки), значно вплине на загальний, результуючий опір усього ланцюга.

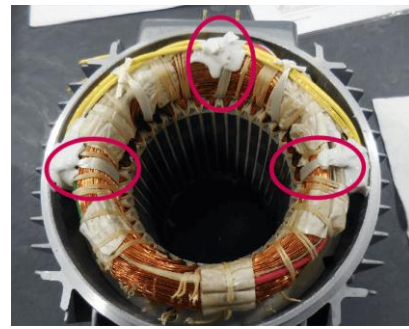
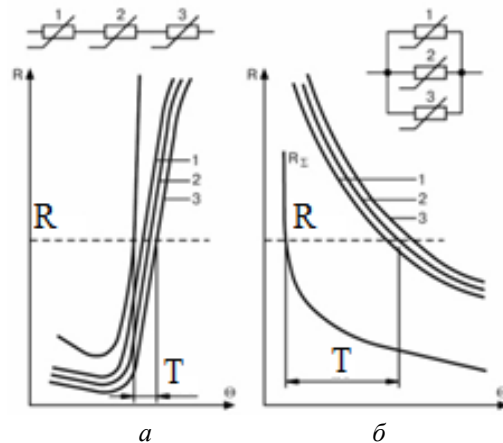


Рис. 5. Фрагмент трифазного АД з термісторами у лобовій частині обмоток статора



а – послідовне з'єднання PTC-термісторів, б – паралельне з'єднання NTC-термісторів

Рис. 6. Залежності опору від температури термісторів

Найбільш поширеним на сьогодні для трифазних АД з короткозамкненим ротором напругою до 0,66 кВ є використання температурного захисту на основі PTC-термісторів перемикаючого типу. Приклад такого рішення із трьох послідовно з'єднаних PTC-термісторів наведено на рис. 7. За необхідності попереднього попередження про перегрівання двигуна перед його відмиканням, в обмотки можуть додатково встановлюватися окремі PTC-термістори з більш низькою температурою.

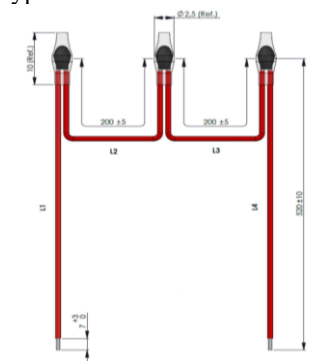
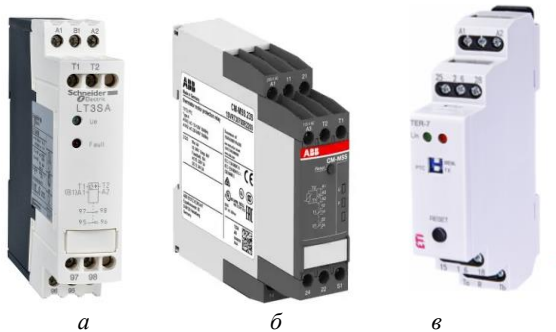


Рис. 7. Приклад загального вигляду термісторного ланцюга з трьох PTC-термісторів для встановлення в АД

Апаратна складова термісторного захисту – це застосування спеціалізованих апаратів, які можуть працювати з термісторами в якості датчиків температури, а саме - реле термісторного захисту АД (термісторне реле

захисту) – рис. 8 або універсальні мікропроцесорні реле захисту АД з функцією термісторного захисту. Такі реле відмикають ланцюг живлення контактора АД у разі перевищення температури нагріву обмоток двигуна допустимого значення, яка контролюється безпосередньо вбудованими в обмотки двигуна термісторами.

На актуальному ринку електричних апаратів вказані реле представлені багатьма відомими виробниками. На рис. 8, у якості прикладу, наведено декілька конструкцій термісторних реле захисту в яких, у якості датчика температури, використовуються РТС-термістори.



а – серія LT3SA (виробник Schneider Electric),
б – серія SM-MSS (виробник ABB),
в – серія TER-7 (виробник ETI)

Рис. 8. Загальний вигляд термісторних реле

Типова схема підключення термісторного реле показана на рис. 9, де: термінали 10 та 12 - нормально замкнений (розмикаючий) контакт вихідного електромагнітного реле; 1 та 2 - живлення реле (на схемі це змінна напруга 220 В, проте випускаються реле і на інші напруги живлення); 7 та 9 - підключення ланцюга РТС-термісторів.

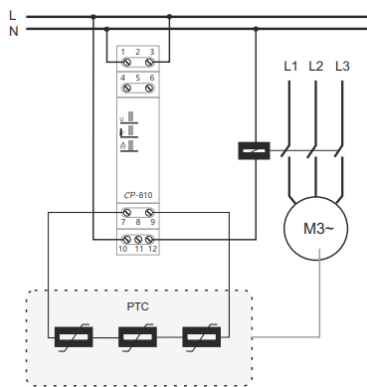


Рис. 9. Схема підключення термісторного реле захисту АД

Принцип дії термісторного реле полягає в моніторингу опору термісторів. Реле працює за принципом замкненого кола, тому вихід знеструмлений, доки не підключено живлення, в увімкненому стані АД у нормальних умовах вихідний контакт термісторного реле замкнений - через нього протікає струм обмотки електромагнітного контактора. При підвищенні опору термісторів, навіть одного, контакти реле розмикаються, чим розривають ланцюг живлення обмотки електромагнітного контактора.

Термісторні реле можуть мати функцію автоматичного та (чи) ручного скидання. При автоматичному скиданні контакти реле повертаються в початковий стан при зменшенні температури термісторів нижче граничного значення, при ручному – по зовнішній команді за умови зменшення температури термісторів нижче граничного значення. Також виробниками передбачається спрацьовування реле у разі обриву чи замикання у ланцюзі термісторів.

Важливими параметрами термісторних реле є критичні значення опору термісторів, на які потрібно звертати увагу під час вибору реле для захисту того чи іншого електродвигуна.

За способом технічної реалізації сучасні термісторні реле поділяються на аналогові та мікропроцесорні (цифрові).

В мікропроцесорних реле основний процес, а саме розрахунок опору термістора та переведення опору в температуру, віддається на мікропроцесор, який вже буде давати команду на спрацьовування реле при досягненні граничних значень.

При роботі термісторного реле на мікропроцесорній основі, або ж в універсальних мікропроцесорних реле захисту АД з наявною функцією термісторного захисту, на перший план виходить математична модель обчислення температури, її точність та швидкість реакції на зміну температури. Найбільш поширеними моделями з визначення температури для мікропроцесорних термісторних реле є математична модель Стейнхарта-Харта, експоненційна модель та лінійна апроксимація. Всі три математичні моделі мають свої переваги та недоліки. Модель Стейнхарта-Харта добре підходить для розрахунків коли необхідна точність розрахунків, наприклад, для захисту відповідальних, чи кліматично складних, ділянок виробництва, а ціною на елементну базу можна знехтувати. Експоненційна модель є універсальним рішенням з середніми показниками точності, діапазону та складності, тож є досить гарним рішенням для застосування в більшій частині електричних апаратів побутового чи промислового призначення. Лінійна апроксимація - це найпростіша математична модель, яка є гарним рішенням для моніторингу температури в режимі реального часу.

На зараз існує досить багато сфокусованих рішень термісторних реле, тому для подальшого їх удосконалення доцільним буде проведення додаткового аналізу таких схем та алгоритмів їх роботи.

Стандартизація термісторного захисту електродвигунів. Термісторний захист асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором регулюються наступними основними стандартами Міжнародної електротехнічної комісії (IEC).

IEC 60034-11:2020 Rotating electrical machines - Part 11: Thermal protection [4]. Цей стандарт визначає вимоги щодо використання температурних вимикачів та теплових датчиків (термісторів), вбудованих в обмотки статора або розміщених в інших відповідних місцях в АД, з метою захисту їх від серйозних пошкоджень внаслідок теплових перевантажень. Цим стандартом встановлюються максимальні температури нагріву обмоток АД з різними класами нагрівостійкості

при повільних та при швидких температурних перевантаженнях. При повільних температурних перевантаженнях для класу нагрівостійкості 130(B) максимальна температура нагріву ізольованої обмотки складає 145 °C, класу 155(F) – 170 °C, класу 180(H) – 195 °C, класу 200(N) – 215 °C. При швидких температурних перевантаженнях для класу нагрівостійкості 130(B) максимальна температура нагріву ізольованої обмотки складає 225 °C, класу 155(F) – 250 °C, класу 180(H) – 275 °C, класу 200(N) – 295 °C.

IEC 60947-8:2021 Low-voltage switchgear and controlgear - Part 8: Control units for built-in thermal protection (PTC) for rotating electrical machines [5]. Даний стандарт встановлює вимоги до блоків контролю що використовують термістори для захисту (термісторних реле захисту) електродвигунів. Це друге видання цього стандарту, воно скасовує та замінює перше видання стандарту, опубліковане у 2003 році з поправками 2006 і 2011 років.

IEC 60539-1:2022 Directly heated negative temperature coefficient thermistors - Part 1: Generic specification [6]. Вказаний стандарт визначає вимоги до термісторів з негативним температурним коефіцієнтом (NTC), які використовуються в термісторних системах захисту АД.

IEC 60539-1:2022 Thermistor – Directly heated positive temperature coefficient – Part 1: Generic specification [7]. Стандарт визначає вимоги до термісторів з позитивним температурним коефіцієнтом (PTC), які часто використовуються в термісторних системах захисту АД.

Висновки. На основі проведеного аналізу термісторного захисту від перегріву трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором напругою до 0,66 кВ визначено переваги та недоліки різних видів термісторного захисту асинхронних двигунів, що дозволяє обґрунтовано вибрати оптимальний варіант захисту залежно від умов експлуатації та вимог до надійності електродвигунів у відповідності з сучасними стандартами щодо термісторного захисту двигунів.

Для подальшого удосконалення термісторного захисту АД необхідне проведення додаткового аналізу існуючих схемо-технічних рішень термісторних реле та алгоритмів їх роботи.

Список літератури

1. Чепелюк О.О., Милашич А.В. Аналіз апаратного захисту асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором напругою до 0,66 кВ від перенавантажень та перегріву. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 1 (11) (Лип 2024), 19–23. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.04>.
2. PTC Thermistor [Електронний ресурс] eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ptc-thermistor/# (дата звернення 01.03.2024).
3. NTC Thermistor [Електронний ресурс] eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/ (дата звернення 01.03.2024).
4. IEC 60034-11:2020 Rotating electrical machines - Part 11: Thermal protection [Електронний ресурс] <https://webstore.iec.ch/publication/64293> (дата звернення 01.02.2024).
5. IEC 60947-8:2021 Low-voltage switchgear and controlgear - Part 8: Control units for built-in thermal protection (PTC) for rotating electrical machines [Електронний ресурс] <https://webstore.iec.ch/en/publication/64939> (дата звернення 01.02.2024).
6. IEC 60539-1:2022 Directly heated negative temperature coefficient thermistors - Part 1: Generic specification [Електронний ресурс] <https://webstore.iec.ch/en/publication/66388> (дата звернення 01.02.2024).
7. IEC 60539-1:2022 Thermistors - Directly heated positive temperature coefficient - Part 1: Generic specification [Електронний ресурс] <https://webstore.iec.ch/en/publication/66388> (дата звернення 01.02.2024).

References (transliterated)

1. Chepeliuk O.O., Mylashych A.V. Analiz aparatnoho zakhystu asynkronnykh dyvuhuniv z korotkozamknenym roto-rom napruhoiu do 0,66 kV vid perenavantazhen ta perehrivu. *Visnyk NTU «KHPi». Seriya: Problemy udosko-naliuvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka.* 1(11), 2024, Pp. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.04>.
2. PTC Thermistor [Elektronnyi resurs] eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ptc-thermistor/# (data zvernennia 01.03.2024).
3. NTC Thermistor [Elektronnyi resurs] eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/ (data zvernennia 01.03.2024).
4. IEC 60034-11:2020 Rotating electrical machines - Part 11: Thermal protection [Elektronnyi resurs] <https://webstore.iec.ch/publication/64293> (data zvernennia 01.02.2024).
5. IEC 60947-8:2021 Low-voltage switchgear and controlgear - Part 8: Control units for built-in thermal protection (PTC) for rotating electrical machines [Elektronnyi resurs] <https://webstore.iec.ch/en/publication/64939> (data zvernennia 01.02.2024).
6. IEC 60539-1:2022 Directly heated negative temperature coefficient thermistors - Part 1: Generic specification [Elektronnyi resurs] <https://webstore.iec.ch/en/publication/66388> (data zvernennia 01.02.2024).
7. IEC 60539-1:2022 Thermistors - Directly heated positive temperature coefficient - Part 1: Generic specification [Elektronnyi resurs] <https://webstore.iec.ch/en/publication/66388> (data zvernennia 01.02.2024).

Надійшла (received) 10.11.2024

Відомості про авторів / About the authors

Чепелюк 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 Vlodymyrovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3849-6139>; e-mail: mr.milashich@gmail.com.