

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-21>

УДК 621.312.17

В. В. Гузенко^{1,2}, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-8171-9487

С. В. Галько², канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-7991-0311

С. В. Чаусов², канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0003-3811-9077

М. С. Сорокін¹, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-7524-7687

Ю. М. Хандола¹, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-9158-2955

¹ Державний біотехнологічний університет² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: hnaghv@btu.kharkov.ua

РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ДВИГУНА В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Анотація. У статті аналізуються нестационарні теплові процеси електричних машин, побудована проста математична модель для розрахунку температури статорної обмотки в асинхронному двигуні. Проаналізовано систему контролю температури обмотки двигуна. Експериментально досліджені температурні процеси у двигуні при складних режимах його роботи. Зазначено, що результати розрахунку за спрощеною моделлю теплового динамічного процесу значно відрізняються від експерименту, що підтверджує необхідність контролю температури обмоток двигуна та реальний час для параметричної корекції системи векторного управління електроприводом змінного струму.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, електропривод, математична модель, аграрно-промисловий комплекс, температурні процеси.

Постанова проблеми. Однією з проблем, пов'язаних із побудовою бездатчикового векторного електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна, є залежність електроприводу від зміни електричних параметрів двигуна під час обертання. Як показують дослідження, це залежить від зміни температури активних опорів електричного двигуна, та від зміни намагнічування залежно від електричних параметрів ланцюга. Рішенням цієї задачі при побудові векторного аналізатора стану асинхронного двигуна є використання регуляторів для параметричних показників, які залежать від швидкості обертання, що функціонують у перехідних режимах [1, 2]. Найбільш контрольованим параметром є параметрична адаптація, що може здійснюватися у реальному часі під час роботи електроприводу [2]. Перехідні теплові процеси в електричних двигунах, як показують дослідження, можуть мати місце під час роботи. Перелічені процеси спостерігаються у режимах гальмування, пуску, зміни навантаження та частоти обертання електричного двигуна [3, 4]. Важливе місце займають процеси неконтрольованого нагрівання при перевантаженнях, при частих і тривалих запусках електричного двигуна, а також при роботі їх у режимі короткого замикання, що характерно для електроприводу підйомно-транспортних засобів, які працюють в умовах підвищених вібрацій та ударних механічних навантажень [5]. Важливістю перехідних теплових режимів, або нестійких перехідних процесів, електричних двигунів є їх інерційність, що спостерігається у відставанні змін параметрів від усталених перехідних режимів [6]. Підвищена температура обмоток викликає зміну їх електричних параметрів, що тягне збільшення помилки управління в системах з моделлю двигуна. Введення в алгоритм керування додаткового розрахунку температури обмоток є актуальним напрямком для покращення режимів роботи системи і вимагає побудову теплової моделі для асинхронного двигуна по нагріванню.

Аналіз останніх досліджень. Як показують дослідження метод еквівалентних величин набуває найбільшого розповсюдження через простоту і легкість розрахунків, які використовуються для вибору двигуна за потужністю. Така методика заснована на застосуванні теплових опорів [7, 8], які з'єднуються в теплову мережу, що моделює всі шляхи передачі теплових процесів у електричній машині. Основним недоліком такого методу зазначено в тому, що він може не давати повної картини температурних процесів, проте спостережені були деякі середні параметри температури окремих частин двигуна. Водночас він вимагає повних відомостей про конструкційні параметри реального двигуна, які з паспортних даних на двигуні визначити не можна, та відомості про початкові значення температури обмоток та навколишнього середовища. Алгоритм управління приводу з такою тепловою моделлю двигуна, як показують дослідження, втрачає універсальність.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Дослідження процесів реалізації системи контролю температури двигуна в електроприводі змінного струму.

Під час вирішення поставленої мети були проведені довготривалі дослідження температурних процесів в електроприводі на кафедрі Електромеханіки та робототехніки в ДБТУ.

Для реалізації поставлених цілей статті необхідно вирішити наступні задачі:

- Прямим методом (експериментально) дослідити характер протікання теплових процесів при нагріванні електродвигуна (ЕД), отримати дані залежності $\tau = f(t)$;
- Непрямими методами, на основі даних експериментів, визначити сталі часу нагрівання ЕД;
- Дослідити спрощену модель двигуна як тіла нагрівання та скласти систему рівнянь;
- Розробити систему контролю температури двигуна в електроприводі змінного струму.

Основна частина. У роботі запропоновано контролювати температуру двигуна датчиками температури у реальному часі. Температуру елементів двигуна без контролю розраховувати через постійні коефіцієнти [14]. В роботі застосована тепла модель електричної машини, яка складається з двох циліндрів (рис. 1)

Зовнішній елемент із теплоємністю C_2 характеризує масу заліза електричного двигуна. В той же час внутрішній елемент, який має теплоємність C_1 – обмотки нерухомої частини двигуна. Потужність теплового потоку від сталі до навколишнього середовища пропорційна коефіцієнту A_2 .

У внутрішньому циліндрі передбачений канал, що характеризує відведення теплоти потоками повітря від внутрішніх частин машини. Проходження теплового потоку від нерухомої частини двигуна і міді до навколишнього середовища пропорційна коефіцієнту A_1 . При цьому теплопередача від міді і внутрішньої частини двигуна визначається коефіцієнтом A_{12} , що характеризує термічний опір ізоляції. Показаний тепловій моделі відповідає система рівнянь [9, 10]:

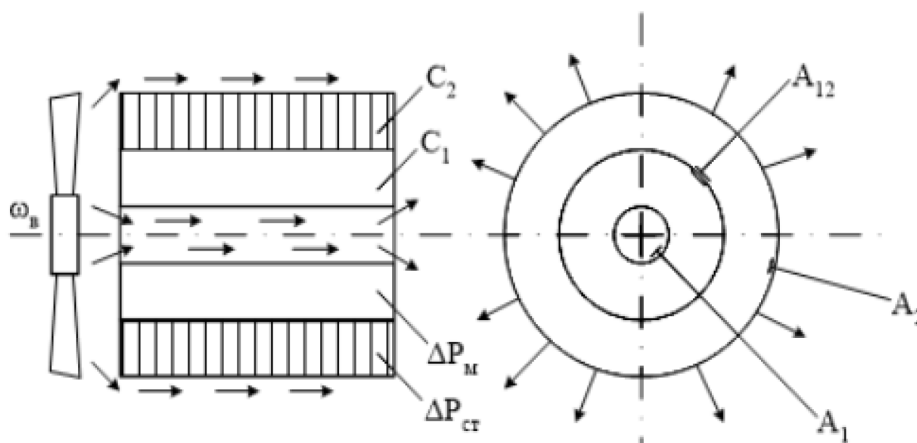


Рис. 1. Спрощена тепла модель електричної машини

$$\Delta P_m = A_{12}(\Delta\theta_m - \Delta\theta_{cm}) + A_1 \cdot \Delta\theta_m + C_1 \frac{d\theta_m}{dt}; \quad (1)$$

$$\Delta P_{cm} = A_2 \cdot \Delta\theta_{cm} - A_{12}(\Delta\theta_m - \Delta\theta_{cm}) + C_2 \frac{d\theta_{cm}}{dt}, \quad (2)$$

де $\Delta\theta_m$, $\Delta\theta_{cm}$ – перевищення температури міді та сталі більше ніж температура навколишнього середовища.

При дослідженні диференціальних рівнянь (1) та (2) з використанням комп'ютерних програм, наприклад, Simulink, яка відноситься до складу MatLab пакету, представили систему в операторній формі. Під час дослідження використовувались початкові параметри, такі як початкові показники температури міді та сталі:

$$A_{1*} \cdot \theta_m(p) - A_1 \cdot \theta_s(p) + A_{12} \cdot \theta_m(p) - A_{12} \cdot \Delta\theta_{cm}(p) + C_1[p \cdot \theta_m(p) - \theta_m(0)] = \Delta P_m(p); \quad (3)$$

$$A_{12} \cdot \theta_{cm}(p) - A_2 \cdot \theta_s(p) - A_{12} \cdot \theta_m(p) + A_{12} \cdot \Delta\theta_{cm}(p) + C_2[p \cdot \theta_{cm}(p) - \theta_{cm}(0)] = \Delta P_{cm}(p), \quad (4)$$

де $\theta_m(0)$ – початкова температура міді, °С;

$\theta_{cm}(0)$ – початкова температура сталі, °С.

Результати моделювання показників нагрівання з використанням у процесі досліджень асинхронного електричного двигуна марки Т2А80/2 представлені на рисунку 2.

Під час дослідження початкова температура повітря приймалася рівною 11 °С, початкові температури міді і сталі дорівнюють температурі навколишнього середовища.

В результаті дослідження було зафіксовано, що середня температура міді приймає значення 83 °С за 30 хв, постійна часу процесу 500 с.

При роботі приводу на низьких швидкостях та великих навантаженнях температурний режим двигуна швидко змінюється і для якісного керування необхідний контроль температури обмоток двигуна та параметрична адаптація системи, що здійснюється у реальному часі під час роботи приводу [11–18].

У роботі, під час вирішення завдання дослідження та побудови системи контролю температури, зупинилися на цифровому датчику температури DS18B20.

Запропоновано у блоці адаптації виконувати перерахунок параметрів регуляторів системи управління в залежно від зміни параметрів двигуна від реальної температури обмоток двигуна, що змінюється у процесі роботи приводу.

Контроль температури двигуна датчиками з аналоговими сигналами (термоперетворювач опору, термоелектричний перетворювач) вимагає складний фільтр електромагнітних перешкод [19, 20].

Датчик температури DS18B20 має цифровий інтерфейс та працює з контролером Arduino за протоколом передачі даних One-Wire® і дозволяє підключити кілька датчиків однією шиною.

У роботі використовувалося два датчики DS18B20: один кріпився на статорній обмотці, другий на корпусі статора. Програмований логічний контролер Arduino Uno та інструментальні засоби програмування забезпечують гнучкість, необхідне рішення широкого спектра завдань автоматизації, дозволяють реалізувати передачу даних WiFi. Віртуальний прилад для вимірювання температури обмотки двигуна створено в середовищі LabVIEW. Експериментальні дослідження температурного режиму двигуна (рис. 3) проводилися на лабораторному стенді, що включає перетворювач частоти VFD-У компанії Delta Electronics, асинхронний двигун Т2А80/2 ($P_{ном} = 1,1$ кВт, $n_{ном} = 2850$ об/хв, $I_{ном} = 7,4$ А, $M_{ном} = 30$ Н · м), навантажувальний агрегат, виконаний на основі генератора постійного струму (ГПТ) з незалежним збудженням 30М із вбудованими вимірником моменту та імпульсним датчиком швидкості. Стенд розроблений на основі апаратної платформи NI PXI компанії National Instruments, з програмним забезпеченням, розробленим з використанням технології віртуальних приладів у графічне середовище програмування NI LabVIEW.

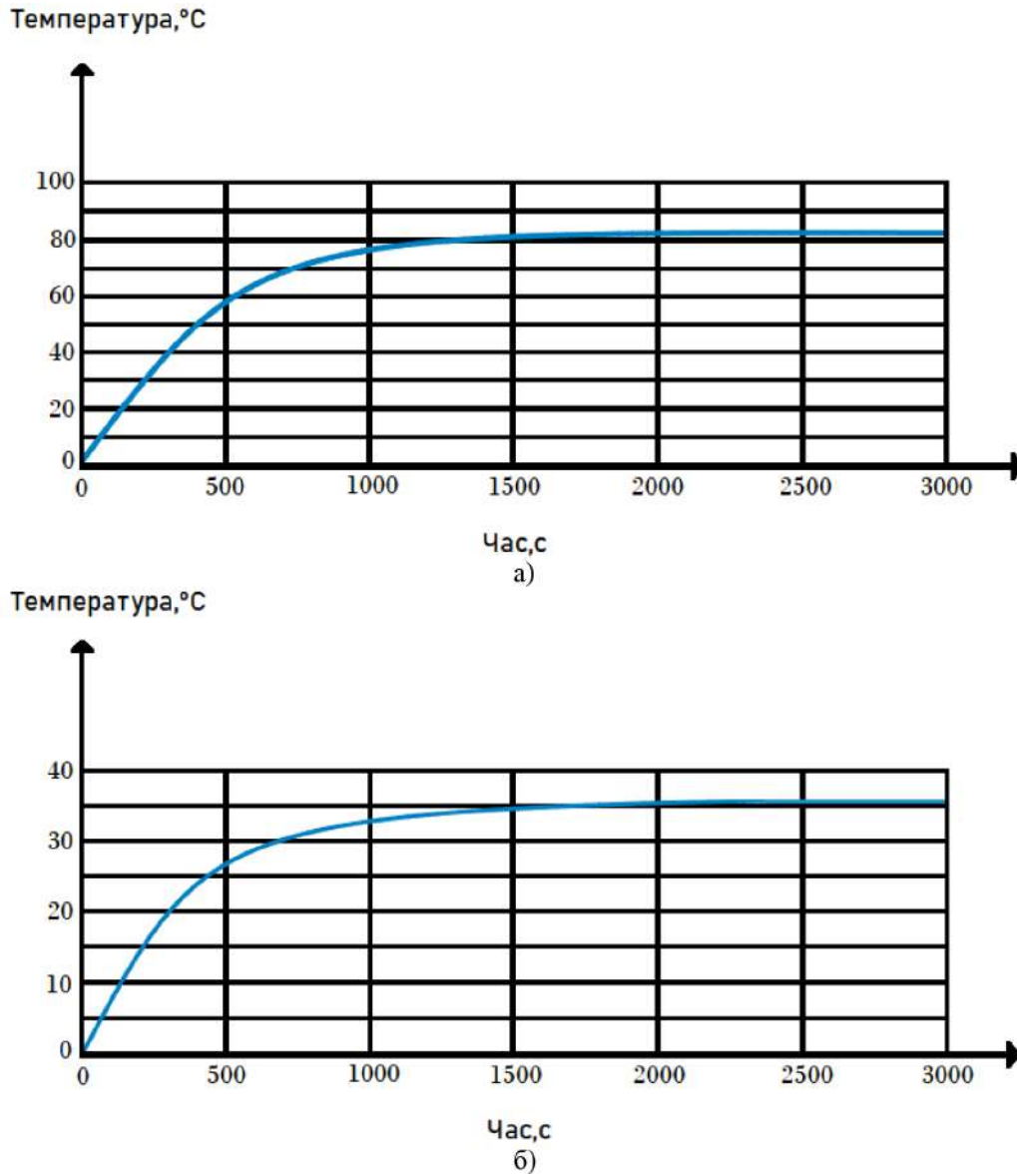


Рис. 2. Результати моделювання процесу нагрівання на прикладі асинхронного двигуна закритого виконання марки Т2А80/2
а) перевищення температури міді; б) перевищення температури сталі

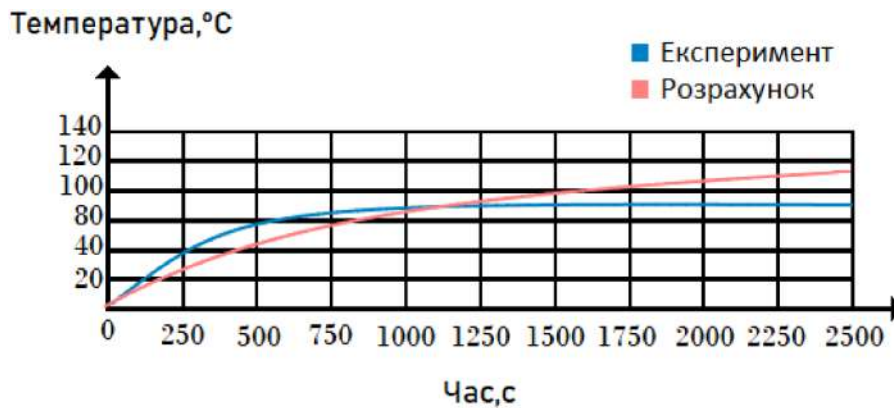


Рис. 3. Розрахункова та експериментальна перехідна характеристика перевищення температури міді обмотки статора

Висновки. Дослідження електромеханічної системи при номінальній швидкості обертання та 50 % номінального навантаження спостерігалось перевищенням температури статора на 10 °С (постійна часу процесу 400 с). При швидкості обертання ротора $0,3n_{ном}$ та 50 % номінальному навантаженні, значення перевищення температури статора на 40 °С (постійна стала часу процесу 280 с), статорної котушки на 85 °С (постійна стала часу процесу 200 с). Результати розрахунку за шуканою моделлю теплового динамічного процесу значно відрізнялися від експерименту (рис. 3), що підтверджує необхідність контролю температури обмоток двигуна у реальному часі.

Список використаних джерел

1. Berzoy A., Mohammed O. A. & Restrepo J. Analysis of the Impact of Stator Interturn Short-Circuit Faults on Induction Machines Driven by Direct Torque Control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018. 33. 1463–1474. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2827170>
2. Surya G. N., Khan Z. J., Ballal M. S., Suryawanshi H. M. A Simplified Frequency-Domain Detection of Stator Turn Fault in Squirrel-Cage Induction Motors Using an Observer Coil Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. 64. 1495–1506. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2611585>
3. Dehghan H., Haghjoo F., Cruz S. M. A Flux-Based Differential Technique for Turn-to-Turn Fault Detection and Defective Region Identification in Line-Connected and Inverter-Fed Induction Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018. 33. 1876–1885. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2837389>
4. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. 415–423. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43
5. Hussienat L. H., Aldaikh S. O., Qawaqzeh M., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Sabo A., Ostroverkhov M., Miroshnyk O., Shchur T., Kieľbasa P. Asynchronous motor functional state monitoring based on the relative deviations of the power losses. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. 100 (7). 26–29. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2024.07.06>
6. Hussienat L. H., Qawaqzeh M., Vovk O., Halko S., Ostroverkhov M., Sabo A., Miroshnyk O., Shchur T., Tomczuk K., Tomczuk P., Chrzanowicz M. Preservation of the asynchronous motor operational resource and reduction of the additional thermal wear under reduced voltage starting. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2025. 100(8). 73–84. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2025.08.10>
7. Hmida M. A., Braham A. ARM based RSWPT implementation for embedded condition monitoring of induction motor. IECON 2016-42nd Annual Conference of the *IEEE Industrial Electronics Society*, 2016. 1464–1469. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7794066>
8. Юрченко О., Лівенко Т., Матвеев О., Беркут Р., Бугайов В. Технологія ремонту електродвигунів різного призначення. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2023. 13(2). URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/433>
9. Галько С. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств: монографія / С. В. Галько, В. Я. Жарков, А. В. Жарков. Мелітополь : Люкс, 2019. 215 с.
10. Al-Issa H. A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. 12(3). 2323–2334. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>
11. Al-Quraan T. M. A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Zayed N. M., Islam A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. 7(4). 92. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>
12. Guven Y., Atis S. Implementation of an embedded system for real-time detection of rotor bar failures in induction motors. *ISA transactions*. 2018. 81. 210–221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.08.004>
13. Wang Z. M., Yang J., Li H., Zhen D., Gu F., Ball, A. Improved cyclostationary analysis method based on TKEO and its application on the faults diagnosis of induction motors. *ISA transactions*. 2021. 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.10.026>
14. Bazan G. H., Goedel A., Scalassara P. R., Endo W., Nunes E. A., Takase V. T., Guedes J. J., Gentil, M. G. An Embedded System for Stator Short-Circuit Diagnosis in Three-Phase Induction Motors Using Information Theory and Artificial Neural Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2022. 52. 582–592. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2022.3149851>



15. Burriel-Valencia J., Puche-Panadero R., Martínez-Román J., Sapena-Bano A., Riera-Guasp M., Pineda-Sánchez M. Multi-Band Frequency Window for Time-Frequency Fault Diagnosis of Induction Machines. *Energies*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12173361>
16. Моделювання електромеханічних систем: підручник / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой. Кременчук, 2001. 410 с.
17. Електропривод у питаннях і відповідях: навч. посіб. для студентів вищ.навч.закл. / М. Л. Лисиченко, П. І. Савченко, О. К. Тищенко, В. В. Гузенко. Х : ХНТУСГ; Факт, 2012. 500 с.
18. Регульований електропривод: підручник / І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Л. С. Червінський, Д. А. Абдураманов, А. В. Торопов, О. В. Санченко; За ред. І. М. Голодного. К. : ТОВ «ЦП «Компринт», 2015. 509 с.
19. Червінський Л. С. Моделювання регульованого електропривода, апаратів та поточкових ліній / Л. С. Червінський, І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко [та ін.]. К. : Агроосвіта, 2013. 240 с.
20. Qawaqzeh M., Dudnikov S., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Trunova I., Pazyi V., Danylchenko D., Halko S., Buinyi R. Development of algorithm for the operation of a combined power supply system with renewable sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2022. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372>

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



V. Huzenko^{1,2}, S. Halko¹, S. Chausov¹, M. Sorokin², Yu. Khandola²
¹ Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
² State Biotechnological University

IMPLEMENTATION OF ENGINE TEMPERATURE CONTROL SYSTEM IN AC ELECTRIC DRIVE

Summary

The purpose of this article is to build a model of a robotic mobile platform capable of navigating rough terrain. The article describes the components required to assemble a mobile robotic platform based on the Arduino Mega. Connection diagrams for the device's main electronic components are provided. A description of the connections for the device's main electronic components is provided. A modification of the electric drive is described that will allow this electronic component to be adapted to the task at hand. This article analyzes the transient thermal processes of electric motors and constructs a simple mathematical relationship for calculating the temperature parameters of the stator winding in an electric machine. A motor winding temperature control system is analyzed. Transient processes in the motor are investigated, and the results are experimentally confirmed under challenging operating conditions. It is shown that the calculation results, based on a simplified thermodynamic process relationship, differ significantly from the experimental results, demonstrating the need for real-time monitoring of the electric motor winding temperature for transient correction of the vector control system of an asynchronous AC drive. In this paper, we focused on the DS18B20 digital temperature sensor to address the problem of researching and constructing a temperature control system.

The study of the electromechanical system at the nominal speed of rotation and 50 % of the nominal load observed an excess of the stator temperature by 10° C (time constant of the process 400s). At a rotor rotation speed of 0.3 nm and a 50 % nominal load, the value of the stator temperature overshoot by 40°C (process time constant 280 s), stator coil by 85 °C (process time constant 200 s). The obtained calculations, which were based on the required characteristics of the temperature process, differed significantly from the experimental results, which confirms the importance of monitoring the temperature of the electric motor windings under real conditions.

Keywords: asynchronous electric motor, electric drive, mathematical model, agro-industrial complex, temperature processes.