

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-225-232>  
УДК 621.313



Оригинальная статья

А. Б. Менжинский<sup>1\*</sup>, С. В. Пантелеев<sup>1</sup>, П. Б. Менжинский<sup>2</sup>, А. Л. Сицко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Военная академия Республики Беларусь, пр. Независимости, 220, 220057,  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, ул. Ожешко 22, 230023,  
Гродно, Республика Беларусь

**СТРУКТУРА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.  
ЧАСТЬ 1**

**Аннотация.** Разработаны структура программно-аппаратного комплекса для исследования электрических машин постоянного тока и математическая модель его электромеханической части, учитывающая влияние температуры на сопротивление обмотки якоря. Программно-аппаратный комплекс реализуется на плате Arduino Uno. Отличительной особенностью комплекса является модульная структура, позволяющая проводить исследования электрических машин постоянного тока в различных режимах работы (пуск, регулирование частоты вращения якоря, реверсирование, торможение). Кроме того, имеется возможность реализации различных законов изменения нагрузочного момента, для чего в состав программно-аппаратного модуля входят исследуемая и нагрузочная электрические машины постоянного тока, которые механически соединены между собой с помощью муфты и работают в двигательном и генераторном режимах соответственно. Предложенная модель позволяет описывать электромагнитные процессы в электрических машинах постоянного тока с учетом влияния температуры на сопротивление обмотки якоря, а также перегрева отдельных частей электрической машины. Представленный программно-аппаратный комплекс может найти практическое применение в исследовательских лабораториях при исследовании электрических машин постоянного тока в различных режимах работы.

**Ключевые слова:** электрические машины постоянного тока, структура, программно-аппаратный комплекс, математическая модель, микроконтроллер

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** Менжинский Андрей Борисович – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры Военной академии Республики Беларусь. E-mail: volna05011990@mail.ru; Пантелеев Станислав Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры Военной академии Республики Беларусь. E-mail: rantelev-s-v@mail.ru; Менжинский Павел Борисович – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. E-mail: mpb93@mail.ru; Сицко Александр Леонидович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Военной академии Республики Беларусь. E-mail: 6869108@gmail.com

**Вклад авторов:** Менжинский Андрей Борисович – обоснование концепции, планирование исследования, разработка структуры и математического описания программно-аппаратного комплекса, разработка программного обеспечения в среде программирования Arduino IDE, обобщение результатов исследования; написание и оформление текста рукописи; Пантелеев Станислав Владимирович – участие в разработке математического описания программно-аппаратного комплекса, сбор, анализ и систематизация данных, обобщение результатов исследования, обсуждение результатов исследования, написание и редактирование текста рукописи; Менжинский Павел Борисович – обобщение и обсуждение результатов исследования, участие в разработке математического описания программно-аппаратного комплекса, написание текста рукописи и работа с графическим материалом; Сицко Александр Леонидович – обсуждение результатов исследования, участие в разработке и математическом описании программно-аппаратного комплекса.

**Для цитирования:** Структура программно-аппаратного комплекса для исследования электрических машин постоянного тока. Часть 1 / А. Б. Менжинский [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 225–232. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-225-232>

Поступила в редакцию: 22.12.2023

Доработанный вариант: 25.03.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

*Original article*Andrey B. Menzhinsky<sup>1\*</sup>, Stanislav V. Pantelev<sup>1</sup>, Pavel B. Menzhinsky<sup>2</sup>, Alexander L. Sitsko<sup>1</sup><sup>1</sup>Military Academy of the Republic of Belarus, 220, Nezavisimosty Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus<sup>2</sup>Grodno State University named after Yanka Kupala, 22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Republic of BelarusSTRUCTURE OF SOFTWARE AND HARDWARE MODULE FOR RESEARCH  
OF DC ELECTRICAL MACHINES.  
PART 1

**Abstract.** The structure of a hardware and software complex for the study of DC electric machines and a mathematical model of its electromechanical part taking into account the influence of temperature on the resistance of the armature winding have been developed. The hardware and software complex is implemented on the Arduino Uno board. A distinctive feature of which is the modular structure, which allows conducting research on DC electric machines in various operating modes (start-up, armature speed control, reversing, braking). In addition, it is possible to implement various laws of changing the load moment. For this purpose, the hardware and software module include the studied and load DC electric machines, which are mechanically connected to each other by means of a coupling and operate in motor and generator modes, respectively. The proposed model makes it possible to describe electromagnetic processes in DC electric machines taking into account the influence of temperature on the resistance of the armature winding, as well as overheating of individual parts of the electric machine. The proposed hardware and software module can find practical application in research laboratories in the study of DC electric machines in various operating modes.

**Keywords:** DC electrical machines, structure, hardware and software module, mathematical model, microcontroller

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Author information:** *Andrey B. Menzhinsky* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Deputy Head of the Department at Military Academy of the Republic of Belarus. E-mail: volna05011990@mail.ru; *Stanislav V. Pantelev* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department at Military Academy of the Republic of Belarus. E-mail: pantelev-s-v@mail.ru; *Pavel B. Menzhinsky* – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department at Grodno State University named after Yanka Kupala. E-mail: mpb93@mail.ru; *Alexander L. Sitsko* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department at Military Academy of the Republic of Belarus. E-mail: 6869108@gmail.com

**Authors' contributions:** *Andrey B. Menzhinsky* – substantiation of the concept, research planning, development of the structure and mathematical description of the hardware and software module, software development in the Arduino IDE programming environment, generalization of research results; writing and formatting of the manuscript text; *Stanislav V. Pantelev* – participation in the development of a mathematical description of the hardware and software module, data collection, analysis and systematization, summarizing the results of the study, discussing the results of the study, writing and editing the text of the manuscript; *Pavel B. Menzhinsky* – generalization and discussion of research results, participation in the development of a mathematical description of a hardware and software module, writing the text of a manuscript and working with graphic material; *Alexander L. Sitsko* – discussion of the research results, participation in the development and mathematical description of the hardware and software complex.

**For citation:** Menzhinsky A. B., Pantelev S. V., Menzhinsky P. B., Sitsko A. L. Structure of software and hardware module for research of DC electrical machines. Part 1. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 225–232 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-225-232>

Received: 22.12.2023

Modified: 25.03.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

**Введение.** В настоящее время электрические машины постоянного тока (ЭМПТ) находят широкое применение в электромеханических системах различного назначения, промышленности, транспорте и робототехнике [1, 2]. Широкое применение ЭМПТ обусловлено хорошими пусковыми свойствами, управляемостью, а также устойчивостью к перегрузкам [1, 3, 4]. В связи с этим в Республике Беларусь и в зарубежных странах большое внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям таких электрических машин [1, 3–8].

Достоверность новых научных результатов, полученных в процессе исследования ЭМПТ, может быть проверена только при работе с реальным объектом. В связи с этим для исследования таких электрических машин актуальна разработка программно-аппаратного комплекса.

Потери энергии, возникающие в ЭМПТ, выделяются в виде теплоты, повышающей температуру обмотки якоря, магнитопровода и постоянных магнитов (ПМ). Высокая температура обмотки якоря является одной из основных причин вызывающих старение изоляции [9]. Повышение температуры ПМ ухудшает их характеристики [10]. Указанные условия приводят к уменьшению

срока службы и ухудшению энергетических показателей ЭМПТ<sup>1</sup>. В связи с этим учет влияния температуры на сопротивление обмотки якоря, а также перегрева отдельных частей (обмотки и ПМ) электрических машин при их математическом описании и исследовании весьма важен.

Таким образом, разработка структуры программно-аппаратного комплекса для исследования ЭМПТ, а также математического описания электромагнитных процессов происходящих в его электромеханической части с учетом влияния температуры на сопротивление обмотки якоря, а также перегрева отдельных частей электрической машины, представляет особую актуальность и по этой причине явилась целью настоящего исследования.

**Структура программно-аппаратного комплекса для исследования электрических машин постоянного тока.** В состав программно-аппаратного комплекса для исследования ЭМПТ (рис. 1) входят: автоматический выключатель дифференциального тока АВДТ 32 С16 30мА TDM; импульсный источник питания AC-DC 12 В, 5 А; плата Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328; драйвер L298N; датчик частоты вращения якоря (вала) на основе модуля датчика Холла YS-27; внешний регулятор оборотов (потенциометр); коллекторные ЭМПТ (в качестве примера, maxon A-max) с магнитоэлектрическим возбуждением<sup>2</sup> (могут использоваться и другие коллекторные ЭМПТ с магнитоэлектрическим возбуждением); проволочный переменный лабораторный реостат (ППЛР); реле TONGLING IQC-3FF-S-Z; керамический нагрузочный резистор (КНР); цифровой осциллограф марки GDS-71102 и мультиметр марки UT71E; датчик тока ACS712; датчик напряжения MH-Electronic; персональная электронная вычислительная машина (ПВЭМ) на базе процессора Intel(R) Celeron(R) CPU1 000M 1,8 ГГц.

Электромеханическая часть программно-аппаратного комплекса представляет собой совокупность исследуемой и нагрузочной ЭМПТ. Исследуемая и нагрузочная ЭМПТ механически соединены между собой с помощью муфты и работают в двигательном (двигатель постоянного тока, ДПТ) и генераторном (генератор постоянного тока) режимах соответственно. Нагрузочная электрическая машина входит в состав модуля формирования нагрузочного момента. Мощность нагрузочной электрической машины должна быть соизмерима с мощностью исследуемой.

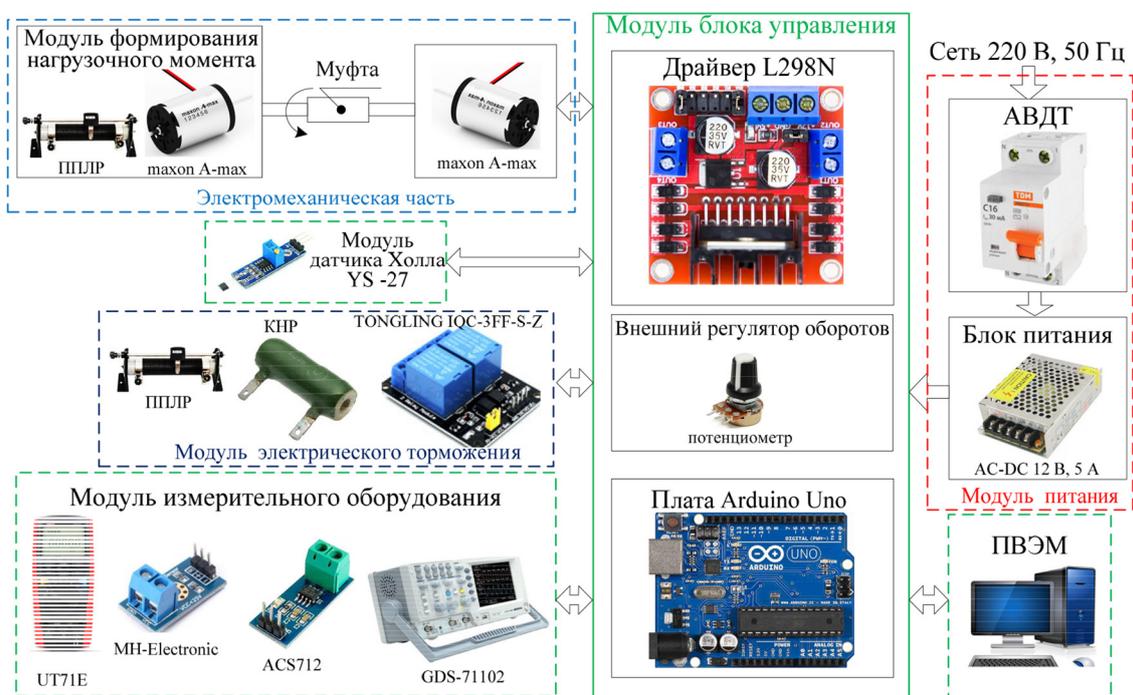


Рис. 1. Структура программно-аппаратного комплекса для исследования электрических машин постоянного тока

Fig. 1. The structure of the hardware and software complex for the study of DC electric machines

<sup>1</sup> Высокоточные приводы и системы. Руководство по выбору. Maxon motor, 2018/2019. 508 с. URL: [https://avi-solutions.com/upload/iblock/563/maxon\\_motor\\_program\\_2018\\_19\\_RU.pdf](https://avi-solutions.com/upload/iblock/563/maxon_motor_program_2018_19_RU.pdf) (дата обращения: 20.12.2023).

<sup>2</sup> Там же.

Математическое описание электромагнитных процессов, происходящих в электромеханической части программно-аппаратного комплекса (в двигательном и генераторном режимах), с учетом влияния температуры на сопротивление обмотки якоря осуществляется системой уравнений [6, 10–12]

$$\begin{cases} U = E_{\text{пр}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right); \\ U_{\text{Г}} = E_{\text{я}} - I_{\text{н}} R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right); \\ M_{\text{дин}} = J d\omega/dt = M_{\text{эм}} - M_{\text{с}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение, подаваемое на двигатель (в цепь якоря);  $E_{\text{пр}}$  – противо-ЭДС, определяемая по формуле  $E_{\text{пр}} = C_e n \Phi_{\text{в}}$  ( $C_e$  – коэффициент ЭДС, определяемый конструкцией машины (электрическая постоянная),  $n$  – частота (скорость) вращения якоря (вала),  $\Phi_{\text{в}}$  – магнитный поток возбуждения (формируемый ПМ));  $I_{\text{я}}$  – ток цепи якоря;  $R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}}$  – сопротивление обмотки якоря при нормальной температуре ( $t = 20^{\circ}\text{C}$ );  $\alpha_{\text{м}}$  – температурный коэффициент сопротивления для меди;  $t_{\text{я}}^{\circ}$  – температура обмотки якоря;  $U_{\text{Г}}$  – напряжение на зажимах ЭМПТ работающей в генераторном режиме;  $E_{\text{я}}$  – ЭДС якоря;  $I_{\text{н}}$  – ток в цепи якоря (ток нагрузки);  $M_{\text{дин}}$  – динамический момент;  $J$  – момент инерции;  $\omega$  – угловая скорость якоря;  $M_{\text{эм}}$  – электромагнитный (вращающий) момент, определяемый по выражению  $M_{\text{эм}} = C_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi_{\text{в}}$  ( $C_{\text{м}}$  – механическая постоянная двигателя, зависящая от его конструкции);  $M_{\text{с}}$  – нагрузочный момент (момент сопротивления), действующий на исследуемую ЭМПТ.

Различают следующие основные режимы работы ДПТ: пуск; регулирование частоты (скорости) вращения якоря; реверсирование (изменения направления вращения вала двигателя); торможение [6].

В программно-аппаратном комплексе для включения указанного двигателя применяются: прямой пуск; пуск путем плавного повышения напряжения. Наличие широкого спектра цифрового измерительного оборудования и программной модели, реализованной в Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328, позволяет получить пусковую характеристику ДПТ.

При прямом пуске обмотка якоря подключается непосредственно к сети. В начале пуска  $n = 0$ , следовательно  $E_{\text{пр}} = 0$ . Поэтому пусковой ток якоря равен

$$I_{\text{я.п}} = \frac{U}{R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right)}. \quad (2)$$

Пусковая характеристика ДПТ качественно изображена на рис. 2.

Частота вращения якоря ЭМПТ регулируется изменением напряжения  $U$ , подводимого в цепь якоря. Частота вращения якоря исследуемой ЭМПТ определяется из системы уравнений (1)

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right)}{C_e \Phi_{\text{в}}}. \quad (3)$$

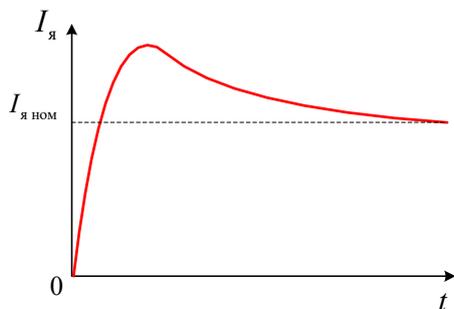


Рис. 2. Пусковая характеристика двигателя постоянного тока

Fig. 2. Starting characteristic of DC motor

Для управления ЭМПТ используется драйвер L298N, в состав которого входят два H-моста [2]. Драйвер также позволяет реализовать режим реверсирования. В режиме реверсирования изменяется направление тока  $I_{\text{я}}$ , что приводит к изменению направления электромагнитного момента  $M_{\text{эм}}$ .

Модуль электрического торможения позволяет реализовать динамическое торможение и торможение противовключением. При динамическом торможении якорь ДПТ отключается от сети и замыкается на КНР. Двигатель при этом переходит в генераторный режим работы, превращая механическую энергию вращения якоря в электрическую, которая рассеивается в виде тепла на резисторе. Направ-

ления тока  $I_{\text{я}}$  и момента  $M_{\text{эм}}$  изменяются на противоположные. Следовательно, момент  $M_{\text{эм}}$  становится тормозящим. Под действием тормозного момента скорость вращения якоря снижается. Торможение противовключением применяют для быстрой остановки ДПТ. Для реализации такого торможения изменяют полярность напряжения  $U$ , приложенного к якорю. В момент остановки якоря напряжение отключается.

Модуль формирования нагрузочного момента создает нагрузочный момент, действующий на исследуемую электрическую машину. Частота вращения якоря ЭМПТ измеряется с помощью модуля датчика Холла YS-27 и программной модели, реализованной в Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328. Таким образом, представляется возможным установить зависимость частоты вращения якоря от других параметров (электрических, электромагнитных величин) электрической машины.

**Регулировочная и механическая характеристики двигателя постоянного тока.** Регулировочная характеристика представляет собой зависимость  $n = f(U)$  при  $M_c = \text{const}$  и  $\Phi_B = \text{const}$ . Учитывая, что в установившемся режиме работы  $M_{\text{эм}} = M_c$ , следовательно  $I_{\text{я}} = M_c / C_M \Phi_B$ , то из уравнения (3) получим

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_B} - \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right) M_c}{C_e C_M \Phi_B^2}. \quad (4)$$

Используя уравнение (4), получим выражение регулировочной характеристики ДПТ

$$n(U) = \frac{1}{C_e \Phi_B} \left( U - \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right) M_c}{C_M \Phi_B} \right) = \frac{1}{C_e \Phi_B} (U - U_{\text{тр}}), \quad (5)$$

где  $U_{\text{тр}} = \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right) M_c}{C_M \Phi_B}$  – напряжение трогания (начала вращения) якоря.

В режиме холостого хода  $M_c = 0$ , следовательно

$$U_{\text{тр}} = \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right) M_c}{C_M \Phi_B} = 0. \quad (6)$$

Поэтому выражение (5) в режиме холостого хода примет вид:

$$n(U) = \frac{U}{C_e \Phi_B}. \quad (7)$$

Механическая характеристика ДПТ представляет зависимость  $n = f(M_c)$  при  $U = \text{const}$  и  $\Phi_B = \text{const}$ . Эту зависимость получим из уравнения (4)

$$n(M_c) = \frac{U}{C_e \Phi_B} - \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right) M_c}{C_e C_M \Phi_B^2} = n_0 - a M_c, \quad (8)$$

где  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi_B}$  – частота вращения якоря (вала) в режиме холостого хода;  $a = \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right)}{C_e C_M \Phi_B^2}$  –

постоянный коэффициент, определяемый конструкцией двигателя.

Регулировочная и механическая характеристики ДПТ качественно изображены на рис. 3.

Коэффициент полезного действия (КПД) ДПТ равен [6, 11]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} 100\%, \quad (9)$$

где  $P_1$  – подводимая к двигателю электрическая мощность, определяемая по выражению  $P_1 = UI_{\text{я}}$ ;  $P_2$  – полезная мощность двигателя, равная механической мощности на его валу;  $\Delta P$  – мощность потерь.

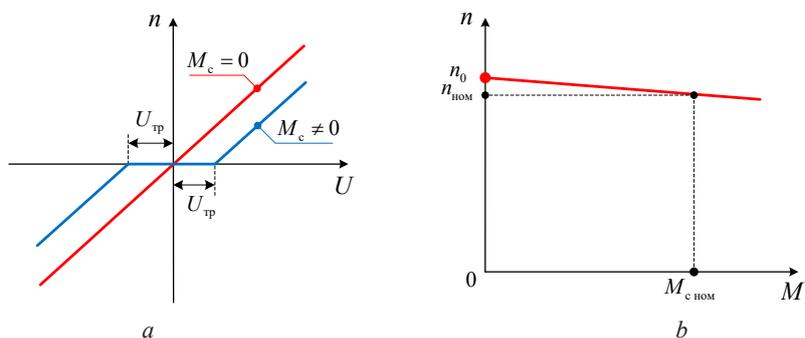


Рис. 3. Характеристики двигателя постоянного тока: *a* – регулировочная; *b* – механическая ( $n_{\text{ном}}$  – частота вращения якоря при  $M_{\text{с ном}}$ ;  $M_{\text{с ном}}$  – номинальный нагрузочный момент)

Fig. 3. Characteristics of DC motor: *a* – adjustable; *b* – mechanical ( $n_{\text{ном}}$  – the rotation frequency of the armature at  $M_{\text{с ном}}$ ;  $M_{\text{с ном}}$  – rated load torque)

При расчете КПД ЭМПТ к основным потерям (без учета потерь в щеточно-коллекторном узле) отнесем тепловые потери в обмотке якоря, то есть в меди  $P_{\text{п.м}}$ :

$$P_{\text{п.м}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right). \quad (10)$$

С учетом (10) выражение (9) запишем следующим образом:

$$\eta = \frac{UI_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right)}{UI_{\text{я}}} 100\%. \quad (11)$$

**Оценка теплового состояния ЭМПТ.** Уравнение теплового баланса в установившемся состоянии имеет вид [10]

$$P_{\text{с}} = \alpha_0 S_{\Sigma} \Delta t_K^{\circ}, \quad (12)$$

где  $P_{\text{с}}$  – суммарные греющие потери (потери вызывающие нагрев ЭМПТ);  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи поверхности корпуса при естественном охлаждении;  $S_{\Sigma}$  – суммарная площадь поверхности корпуса;  $\Delta t_K^{\circ}$  – превышение температуры корпуса над температурой окружающей среды (перегрев корпуса).

Для расчета  $\alpha_0$  в практике проектирования регулируемых синхронных вентильных двигателей с ПМ пользуются формулой [10]

$$\alpha_0 \approx 9 + 0,067 \Delta t_K^{\circ}. \quad (13)$$

Подставляя выражение (13) в уравнение (12), получим

$$0,067 S_{\Sigma} (\Delta t_K^{\circ})^2 + 9 S_{\Sigma} \Delta t_K^{\circ} - P_{\text{с}} = 0. \quad (14)$$

Согласно уравнению (14), перегрев корпуса может быть определен как

$$\Delta t_K^{\circ} = \left( \sqrt{81 S_{\Sigma}^2 + 0,268 S_{\Sigma} P_{\text{с}}} - 9 S_{\Sigma} \right) / 0,134 S_{\Sigma}. \quad (15)$$

Упростив уравнение (15), получим

$$\Delta t_K^{\circ} \approx \sqrt{\frac{4511 S_{\Sigma} + 14,9 P_{\text{с}}}{S_{\Sigma}}} - 67,2. \quad (16)$$

Так как основными потерями в ЭМПТ являются тепловые потери в обмотке якоря, то греющие потери равны

$$P_{\text{с}} = P_{\text{п.м}}. \quad (17)$$

Следовательно, уравнение (16) примет вид

$$\Delta t_K^{\circ} \approx \sqrt{\frac{4511 S_{\Sigma} + 14,9 I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right)}{S_{\Sigma}}} - 67,2. \quad (18)$$

В выражении (18) не учитывается теплоотвод в местах крепления ЭМПТ к приводному двигателю или некоторой поверхности.

Зная  $\Delta t_K^{\circ}$ , перегрев обмотки ( $\Delta t_M^{\circ}$ ) и ПМ ( $\Delta t_{\text{ПМ}}^{\circ}$ ) можно рассчитать по выражениям [10]:

$$\Delta t_M^{\circ} \approx \Delta t_K^{\circ} + (10 \div 20 \text{ }^{\circ}\text{C}), \quad (19)$$

$$\Delta t_{\text{ПМ}}^{\circ} \approx \Delta t_M^{\circ} - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (20)$$

Программно-аппаратный комплекс для исследования ЭМПТ реализуется на плате Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328, которая подключается к ПЭВМ по USB-кабелю. Платы семейства Arduino хорошо подходят для реализации различных мехатронных систем [14]. Основными преимуществами плат семейства Arduino являются: низкая стоимость; удобная для пользователя среда программирования; широкий спектр плат и датчиков, расширяющих функциональность Arduino для управления различными устройствами [13–15]. Для разработки программного обеспечения программно-аппаратного комплекса использовалась среда программирования Arduino IDE [13, 16]. Среда предназначена для написания, компиляции и загрузки кода программы в память микроконтроллера ATmega328, установленного на плате Arduino Uno. Для написания кода применяется упрощенная версия языка программирования C++, известная так же как Wiring [17].

Существуют версии среды программирования Arduino IDE для различных операционных систем (Windows, Linux и Macintosh OSX) [15]. Встроенный в среду программирования Arduino IDE плоттер по последовательному соединению позволяет наблюдать за изменением частоты вращения якоря и электрических величин электрической машины. Данные, полученные по USB-кабелю, далее обрабатываются на ПЭВМ с помощью широкого спектра прикладных программ для решения задач технических вычислений.

**Заключение.** Разработана структура программно-аппаратного комплекса для исследования ЭМПТ. Его отличительной особенностью является модульная структура, позволяющая проводить исследования ЭМПТ в различных режимах работы (пуск, регулирование частоты вращения якоря, реверсирование, торможение). Кроме того, имеется возможность реализации различных законов изменения нагрузочного момента.

Разработана математическая модель электромеханической части программно-аппаратного комплекса, учитывающая влияние температуры на сопротивление обмотки якоря, а также перегрев отдельных частей электрической машины. Данная модель позволяет описывать электромагнитные процессы в электрических машинах постоянного тока с учетом влияния температуры на сопротивление обмотки якоря, а также перегрева отдельных частей электрической машины.

Предложенный программно-аппаратный комплекс может найти практическое применение в исследовательских лабораториях при исследовании ЭМПТ в различных режимах работы. Научная значимость полученных результатов заключается в развитии теории электромеханики применительно к ЭМПТ.

Дальнейшим направлением совершенствования программно-аппаратного комплекса может быть внедрение в его структуру специализированного программного обеспечения для исследования электрических машин.

### Список использованных источников

1. Хлопцов, А. С. Совершенствование методики и средств диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / А. С. Хлопцов. – Омск, 2016. – 154 л.
2. Алексеенко, К. Д. Применение микропроцессорной платформы «Ардуино» в учебной среде для практического изучения основ электропривода / К. Д. Алексеенко, И. А. Носенко // Современные прикладные исследования: материалы 5-й нац. науч.-практ. конф., Шахты, 17–19 марта 2021 г. – Новочеркасск: Юж.-Рос. госуд. политех. ун-т (НПИ) им. М. И. Платова, 2021. – Т. 1. – С. 195–200.
3. Овчинников, И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): курс лекций / И. Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с.
4. Васильев, Д. С. Векторные системы управления электроприводами: учеб. пособие / Д. С. Васильев, Б. И. Фираго. – Минск: Выш. шк., 2016. – 159 с.
5. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Изд. 2-е. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
6. Иванов, И. И. Электротехника: учеб. пособие / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев. – 6-е изд. – СПб.: Лань, 2009. – 496 с.

7. Shin, W. G. Correlation analysis of brush temperature in brush-type DC motor for predicting motor life / W. G. Shin, Y. S. Song, Y. K. Seo // *J. Mech. Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 26, Iss. 7. – P. 2151–2154. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0534-0>
8. A New Method for Sensorless Estimation of the Speed and Position in Brushed DC Motors Using Support Vector Machines / E. Vazquez-Sanchez [et al.] // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2011. – Vol. 59, № 3. – P. 1397–1408. <http://doi.org/10.1109/TIE.2011.2161651>
9. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины: учебник / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 527 с.
10. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения: учеб. пособие / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – СПб.: Корона принт, 2013. – 357 с.
11. Менжинский, А.Б. Электротехника : учеб. пособие / А. Б. Менжинский, А. Е. Каледа, А. Л. Сицко; под общ. ред. А. Б. Менжинского. – Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2022. – 529, [3] с.
12. Черный, В. В. Температурная зависимость сопротивления полупроводников и металлов: учеб.-метод. пособие / В. В. Черный, В. Э. Малаховская. – Минск: БНТУ, 2016. – 36 с.
13. Петин, В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino / В. А. Петин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 400 с.
14. Краткий обзор и перспективы применения микропроцессорной платформы Arduino / Е. Я. Омельченко [и др.] // *Электротехн. системы и комплексы.* – 2013. – № 21. – С. 28–33.
15. Выдрин, Д. Ф. Платформа Ардуино: преимущества / Д. Ф. Выдрин, А. О. Махнева, А. Р. Мавлютов // *Academy.* – 2017. – № 1 (16). – С. 9–12.
16. Шатуновский, В. Л. Комплекс для измерения электрических величин в системах электропитания на базе микроконтроллерных плат «Ардуино» / В. Л. Шатуновский, Н. Н. Портнягин, И. А. Мелик-Шахназарова // *Электротехн. и информ. комплексы и системы.* – 2018. – Т. 14, № 1. – С. 81–87.
17. Контроллер Ардуино / О. В. Царегородцева [и др.] // *Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XXVIII Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 25 мая 2019 г.* – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г. Ю.), 2019. – С. 102–106.

## References

1. Khloptsov A. S. *Improving Methods and Means for Diagnosing the Technical Condition of the Commutator-Brush Assembly of DC Machines.* Omsk, 2016, 154 p. (in Russian).
2. Alekseenko, K. D., Nosenko I. A. Application of the Arduino microprocessor platform in an educational environment for practical study of the fundamentals of electric drives. *Sovremennye prikladnye issledovaniya: materialy 5-i natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Shakhty, 17–19 marta 2021 g. T. 1* [Modern Applied Research: Proceedings of the 5<sup>th</sup> National Scientific and Practical Conference, Shakhty, March 17–19, 2021. Vol. 1]. Novocherkassk, South Russian State Polytechnic University named after M. I. Platova, 2021, pp. 195–200 (in Russian).
3. Ovchinnikov I. E. *Valve Electric Motors and Drives Based on Them (Low and Medium Power).* St. Petersburg, CORONA-Vek Publ., 2006. 336 p. (in Russian).
4. Vasil'ev D. S., Firago B. I. *Vector Control Systems for Electric Drives.* Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2016, 159 p. (in Russian).
5. Firago B. I. *Electric Drive Theory.* Minsk, Technoperspektiva Publ., 2007. 585 p. (in Russian).
6. Ivanov I. I., Solov'ev, G. I. *Electrical Engineering.* St. Petersburg, Lan' Publ., 2009. 496 p. (in Russian).
7. Shin W. G., Song Y. S., Seo Y. K. Correlation analysis of brush temperature in brush-type DC motor for predicting motor life. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, vol. 26, iss. 7, pp. 2151–2154. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0534-0>
8. Vazquez-Sanchez E., Gomez-Gil J., Gamazo-Real J. C., Diez-Higuera J. F. A New Method for Sensorless Estimation of the Speed and Position in Brushed DC Motors Using Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 59, no. 3, pp. 1397–1408. <http://doi.org/10.1109/TIE.2011.2161651>
9. Bruskin D. E., Zorohovich A. E., Hvostov B. C. *Electric Machines and Micromachines.* Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 527 p. (in Russian).
10. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. *Synchronous Electric Reciprocating Machines.* St. Petersburg, Korona-print Publ., 2013. 357 p. (in Russian).
11. Menzhinski A. B., Kaleda A. E., Sicko A. L. *Electrical Engineering.* Minsk, Military Academy Republic of Belarus, 2022. 529 p. (in Russian).
12. Chernyi V. V., Malahovskaya V. E. *Temperature Dependence of Resistance of Semiconductors and Metals.* Minsk, Belarusian National Technical University, 2016. 36 p. (in Russian).
13. Petin V. A. *Projects Using Arduino Controller.* St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2014. 400 p. (in Russian).
14. Omel'chenko E. Ya., Tanich V. O., Maklakov A. S., Karyakina E. A. Brief overview and prospects for using the Arduino microprocessor platform. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 28–33 (in Russian).
15. Vydrin D. F., Makhneva A. O., Mavlyutov A. R. Arduino platform: advantages. *Academy*, 2017, no. 1 (16), pp. 9–12 (in Russian).
16. Shatunovskii V. L., Portnyagin N. N., Melik-Shakhnazarova I. A. Complex for measuring electrical quantities in power supply systems based on Arduino microcontroller boards. *Elektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy = Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2018, no. 1, pp. 81–87 (in Russian).
17. Tsaregorodtseva O. V., Golovanova K. S., Bolgov D. N., Myskova E. V., Tsaregorodtsev M. E. Arduino controller. *Sovremennye tekhnologii: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statei XXVIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Penza, 25 maya 2019 g.* [Modern Technologies: Topical Issues, Achievements and Innovations: Collection of Articles of the 28<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference, Penza, May 25, 2019]. Penza, “Nauka i Prosveshchenie” (IP Gulyaev G. Yu.), 2019, pp. 102–106 (in Russian).