

DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-98-106

УДК 621.316.53

ББК 31.264

В.Н. ПЕТРОВ, Д.Н. НИКОЛАЕВ, Д.Н. НИКИТИН

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПО ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ КОНТАКТОРА

**Ключевые слова:** электромагнитный привод, схема управления, устройство управления, контактор с электромагнитным приводом, вакуумный контактор, широтно-импульсная модуляция, микроконтроллер, алгоритм управления, макет устройства управления, осциллограмма напряжения на обмотке, время срабатывания, ток срабатывания, ток удержания, снижение потребляемой мощности, вибрация контактов.

Одним из приоритетных научно-технологических направлений развития Российской Федерации в области энергетики направлениями развития низковольтной коммутационной аппаратуры является энерго- и ресурсосбережение. В связи с этим для обеспечения конкурентоспособности рынка электротехнической продукции актуальным является вопрос исследования и разработки низковольтной электромагнитной коммутационной аппаратуры с низкими значениями потребляемой мощности и массогабаритных показателей.

**Цель исследования** – снижение потребляемой мощности электромагнитного привода контактора в режиме удержания и повышение электрической износостойкости главных контактов контактора.

**Материалы и методы.** Базой исследования послужили существующие схемы и алгоритмы управления электромагнитным приводом, описания которых опубликованы в различных источниках информации. В качестве исходного объекта исследования был принят электромагнитный привод вакуумного контактора серии КВ1-160. Основные параметры электромагнитного привода контактора КВ1-160: номинальное напряжение управления 220 В постоянного тока, предварительно измеренные универсальным вольтметром АВМ-4306 и испытательным устройством РЕТОМ-21 значения сопротивления обмотки – 62 Ом, потребляемой мощности электромагнитного контактора со штатным блоком в режиме удержания – 15,2 Вт. При выполнении исследования использовались методы анализа и синтеза, измерения, планирования и проведения эксперимента.

**Результаты исследования.** В работе приводятся результаты разработки и исследования устройства управления электромагнитными приводами, обеспечивающего снижение потребляемой мощности электромагнитного привода в режиме удержания, а также увеличение их электрической износостойкости. Предложена схема управления однообмоточным электромагнитным приводом. Приведено краткое описание работы макета устройства управления на базе микроконтроллера. Проведены экспериментальные исследования макета устройства управления с применением трехступенчатого алгоритма управления электромагнитным приводом.

**Выводы.** Результаты экспериментальных исследований показали работоспособность макетного образца устройства управления электромагнитным приводом контактора по предложенной схеме. Достигнуто уменьшение потребляемой мощности электромагнитного привода в режиме удержания, которая составила 25 Вт. Обеспечено незначительное (примерно на 10%) уменьшение времени вибрации главных контактов, что приведет к повышению их электрической износостойкости.

**Введение.** Одним из важных направлений развития коммутационной аппаратуры, в том числе электромагнитных контакторов, является энерго- и ресурсосбережение. В связи с этим в последние 15–20 лет разработчиками коммутационных аппаратов активно проводятся исследования в данной области [15, 17, 18,

22, 24]. Однако, несмотря на попытки применения нейронных сетей для создания интеллектуального контактора [21], в данных исследованиях не решаются задачи оптимального управления, и вопросы разработки электромагнитных приводов (ЭМП) контакторов с низким значением потребляемой мощности и высоким значением электрической износостойкости остаются актуальными и по сей день.

**Цель исследования** – снижение потребляемой мощности ЭМП контактора в режиме удержания и повышение электрической износостойкости главных контактов контактора.

**Материалы и методы.** Базой исследования послужили опубликованные схемы и алгоритмы управления электромагнитным приводом. В этих работах рассматривались особенности протекающих электромагнитных и тепловых процессов [19, 20], а также новые способы [12], алгоритмы [16, 23], схемные решения [6–8, 13, 14, 25] оптимального, в том числе форсированного, управления как нейтральными, так и поляризованными ЭМП. При этом в данных работах не в полной мере решены задачи снижения потребляемой мощности, снижения времени дребезга (вибрации) контактов электрических аппаратов.

Экспериментальная проверка работоспособности макетного образца устройства управления ЭМП проводилась в лабораторных условиях на примере ЭМП вакуумного контактора серии КВ1-160 [2]. Основные параметры ЭМП контактора КВ1-160: номинальное напряжение управления 220 В постоянного тока, предварительно измеренные универсальным вольтметром АВМ-4306 и испытательным устройством РЕТОМ-21 значения сопротивления обмоток 62 Ом, потребляемая мощность электромагнита контактора со штатным блоком в режиме удержания примерно 15,2 Вт.

Ток срабатывания в обмотке ЭМП и напряжения регистратора момента замыкания главных контактов оценивались по осциллограммам.

В качестве алгоритма управления был использован и запрограммирован трехступенчатый алгоритм на основе известного процесса изменения тока в обмотке [5] с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) управляющего сигнала. Данный алгоритм подробно изложен в [12].

При выполнении исследования использовались методы анализа и синтеза, измерения, планирования и проведения эксперимента.

**Результаты исследования.** Для расчета коэффициента заполнения импульсов были зафиксированы значения напряжения и тока срабатывания ЭМП исходного контактора КВ1-160, были сняты осциллограммы тока срабатывания в обмотке ЭМП и напряжения регистратора момента замыкания главных контактов (рис. 1) исходного контактора при сопротивлении шунта  $R_{ш} \approx 0,218$  Ом.

На осциллограмме обозначены характерные точки Б (точка максимума тока) и Г (точка минимума тока). Также дополнительно для сведения указаны точки А (ток в момент трогания якоря) и В (ток в момент замыкания главного контакта).

Стоит отметить, что в составе исходного контактора был штатный блок включения, имеющий свои преимущества (несложное схемное решение, низкая стоимость) и недостатки. Но одним из главных недостатков является фиксированное время включения, отсутствие обратной связи от обмотки управления, а также узкий диапазон напряжения питания.

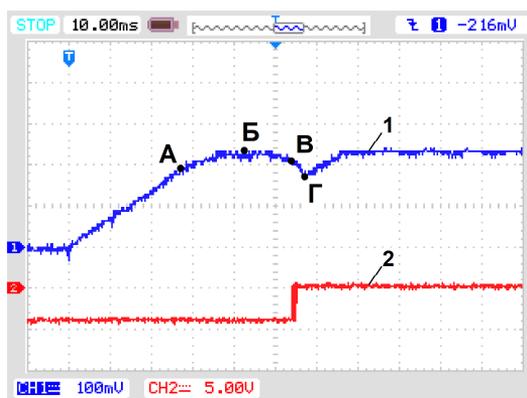


Рис. 1. Осциллограммы ЭМП при  $U_{обм}=U_{сраб}$ :

- 1 – осциллограмма тока в обмотке;
- 2 – осциллограмма напряжения регистратора момента замыкания главных контактов

На основе расчетов и выбора элементов [1, 3, 4, 9–11] разработана схема на базе микроконтроллера (МК), приведенная на рис. 2.

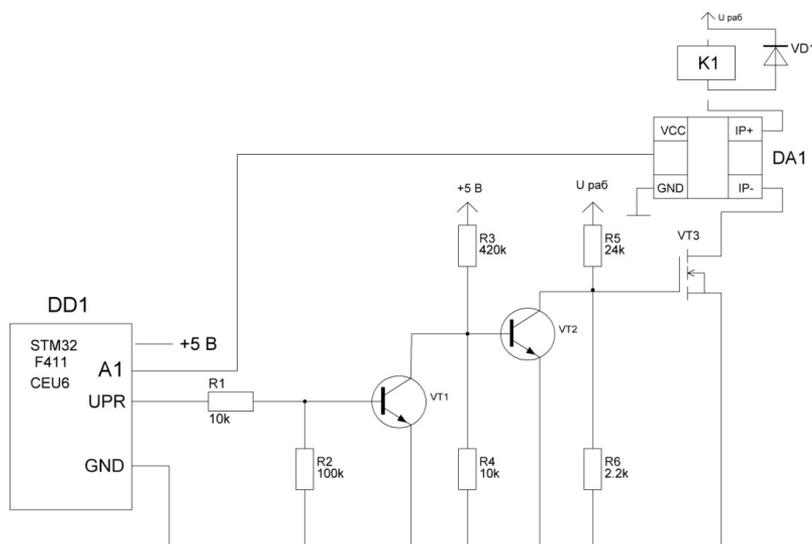


Рис. 2. Схема устройства управления на МК STM32F411

В качестве элементов, обозначенных на схеме, были использованы следующие: *DD1* – макетная плата с МК STM32F411CE6; *VT1* – 2CS3198; *VT2* – ALJ13002; *VT3* – STP20NM60FP; *R1*, *R4* – C1-4-0,125 Вт 10 кОм±10%; *R2* – C2-33-0,125 Вт 100 кОм±5%; *R3* – MF-0,5 Вт 420 кОм±5%; *R5* – KNP-200 2 Вт 24 кОм±5%; *R6* – MF-0,125 Вт 2,2 кОм±5%; *DU1* – датчик тока ACS712; *VD1* – HER607 (6 А, 800 В).

Работа схемы происходит следующим образом. При подаче рабочего напряжения в обмотке контактора *K1* начинает протекать ток, который измеряет

датчик тока  $DA1$  и передает данные на плату с МК  $DD1$  через выход МК  $A1$ . При достижении максимальной величины (точки Б на кривой изменения тока в обмотке) тока МК  $DD1$  изменяет коэффициент заполнения импульсов со 100% до 50%. Далее через канал МК  $UPR$  выдается сигнал управления, который инвертируется в транзисторах  $VT1$ ,  $VT2$  и подается на затвор транзистора  $VT3$ . Далее, после достижения тока минимальной величины (точки Г), МК изменяет коэффициент заполнения импульсов с 50% до 10%, который необходим для уменьшения тока удержания.

На основе разработанной схемы собран макетный образец (рис. 3) для экспериментальной проверки устройства управления ЭМП контактора.

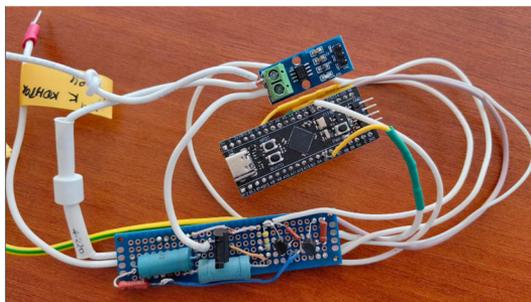


Рис. 3. Внешний вид макетного образца разработанного устройства управления

Как видно из схемы (рис. 2), устройство не содержит специальных блоков для фиксирования максимума и минимума тока. Эту функцию выполняет программа. Суть программы заключается в сравнении двух напряжений, текущего замера  $ADC1$  и предыдущего  $ADC2$ , и в зависимости от ступени алгоритма он выполняет те или иные функции.

На первом этапе работы необходимо включать МК, затем подавать питание на обмотку. Далее программно включается модуль АЦП и выполняется выдержка времени  $del$ , необходимая для защиты от пусковых помех. Результат преобразования пересылается в переменную  $ADC2$ , после чего сравнивается с предыдущим значением  $ADC1$  (в момент первого прохождения цикла равно 0).

Цикл фиксирования максимума повторяется, пока  $ADC1 < ADC2$ , если же  $ADC1 > ADC2$ , то осуществляется переход во вторую ступень срабатывания контактора. Аналогичные действия происходят во второй ступени, с тем отличием, что в нем параллельно реализована ШИМ и проводится подготовка к переходу на третью ступень, условие для которой противоположно таковому для предыдущей ступени. На третьем этапе реализации основного алгоритма необходимости в обратной связи нет, в нем реализовано лишь импульсное управление для уменьшения тока потребления.

Испытание проводилось следующим образом. Схема подключалась к контактору и источнику питания. Щупы осциллографа подключались к устройству управления. Записывалась рабочая программа в МК. Производилась подача напряжения питания к катушке контактора и снимались осциллограммы. В последующих испытаниях для получения качественных осциллограмм производилась

корректировка программы с последующей перезаписью в МК. Программа записывалась с помощью программатора ST-Link V2, обладающего высокой скоростью записи программ. Осциллограммы снимались при подаче напряжения питания  $U_{пит}=200$  В, близкого к номинальному. Осциллограммы при срабатывании ЭМП записывались с помощью цифрового четырехканального осциллографа Rigol DS1204В. При этом для записи осциллограммы тока в обмотке щуп осциллографа подключался к выходу А1 МК (рис. 2).

Полученные осциллограммы тока в обмотке, напряжения на выходе микроконтроллера (работы ШИМ) и напряжения регистратора момента замыкания главных контактов контактора приведены на рис. 4 и 5.

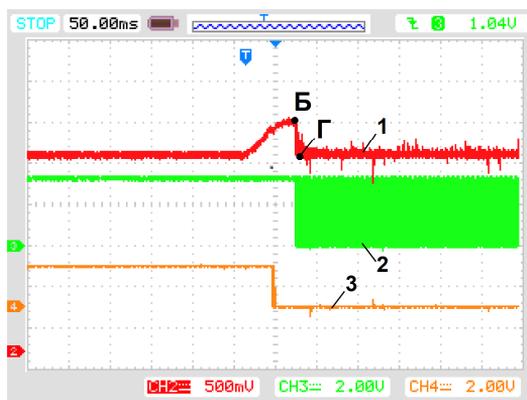


Рис. 4. Осциллограммы ЭМП:

- 1 – осциллограмма тока в обмотке; 2 – осциллограмма работы ШИМ на выходе МК;  
3 – осциллограмма напряжения регистратора момента замыкания главных контактов

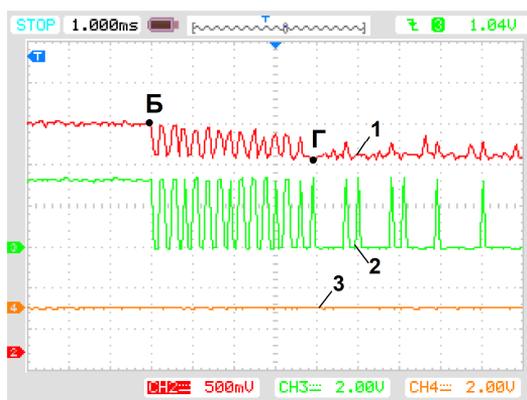


Рис. 5. Развернутые осциллограммы ЭМП (1 мс/клетка)

На рис. 5 видно начало работы (осциллограмма 2) ШИМ при достижении током характерной точки Б, показанной на осциллограмме 1. Величину тока срабатывания можно определить из характеристик датчика тока [1]. На осциллограмме 1 разница между опорным и максимальным напряжением составляет примерно 0,4 В. При чувствительности датчика тока 0,185 В/А максимум тока

в обмотке контактора (в точке Б) составил  $0,4/0,185 = 2,16$  А. Аналогично был определен ток удержания, который составил 0,64 А. Потребляемая мощность в режиме удержания составила 25 Вт, что немного больше потребляемой мощности со штатным блоком.

При достижении током максимального значения в точке Б начинается вторая ступень работы программы, при которой коэффициент заполнения импульсов равен 50%. После достижения током минимального значения в точке Г запускается третья ступень алгоритма. Коэффициент заполнения импульсов при третьей ступени алгоритма составляет 10%, тем самым достигается уменьшение величины потребляемого тока в режиме удержания.

**Выводы.** Результаты экспериментальных исследований показали работоспособность макетного образца устройства управления ЭМП контактора по предложенной схеме. Достигнуто уменьшение потребляемой мощности ЭМП в режиме удержания, которая составила 25 Вт, что немного больше потребляемой мощности со штатным блоком управления.

Также достигнуто незначительное (примерно на 10%) уменьшение времени вибрации главных контактов, что обеспечивает повышение электрической износостойкости контактов.

Следует выделить некоторые перспективы совершенствования устройства: обеспечение работы в широком диапазоне напряжения питания, уменьшение времени вибрации главных контактов, формирование сигналов о замыкании главных контактов и о наличии тока в главной цепи контактора.

#### Литература

1. Датчик тока ACS712. Техническая спецификация [Электронный ресурс]. URL: <https://static.chipdir.ru/lib/837/DOC011837270.pdf> (дата обращения 03.06.2024).
2. Контактор вакуумный KB1. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cheaz.ru/products/lve/contactors/vacuum/kv-1.html> (дата обращения 03.06.2024).
3. *Конченков В.И., Скакунов В.Н.* Семейство микроконтроллеров STM32. Программирование и применение. Волгоград: ВолгГТУ, 2015. 78 с.
4. Микроконтроллер STM32F411CE6. Техническая спецификация [Электронный ресурс]. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers/microprocessors/stm32f411ce.html> (дата обращения 03.06.2024).
5. Основы теории электрических аппаратов для электромеханических систем горных предприятий / *Б.С. Заварыкин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, А.И. Герасимов.* Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2014. 116 с.
6. Пат. 2310938 РФ, МПК H01F 7/18. Устройство форсированного управления электромагнитом постоянного тока / *Матвеев М.Н., Арзамасов В.Л., Сергеев А.Г.*; заявитель и патентообладатель. Открытое акционерное общество «Чебоксарский электроаппаратный завод». № 2006109690/09; заявл. 27.03.2006; опубл. 20.11.2007, Бюл. № 32. 5 с.
7. Пат. 2349978 РФ, МПК H01F 7/18. Устройство управления электромагнитом / *Ильин В.Ф., Матвеев Н.В., Данилов Н.В.*; заявитель и патентообладатель. В.Ф. Ильин. № 2007104267/09; заявл. 05.02.2007; опубл. 10.08.2008, Бюл. № 8. 12 с.
8. Пат. 2636052 РФ, МПК H01F 7/18. Устройство управления электромагнитом постоянного напряжения / *Гаврилов А.Ю., Зайцев М.Ю., Петров В.Н., Свинцов Г.П.*; заявитель и патентообладатель. Чуваш. гос. ун-т. № 2016148989; заявл. 13.12.16; опубл. 20.11.17, Бюл. № 32. 11 с.
9. *Рюмик С.М.* 1000 и одна микроконтроллерная схема. М.: ДМК-Пресс, 2016. Вып. 3. 356 с.
10. *Рюмик С.М.* 1000 и одна микроконтроллерная схема. М.: Додэка-XXI, 2010. Вып. 1. 360 с.
11. *Рюмик С.М.* 1000 и одна микроконтроллерная схема. М.: Додэка-XXI, 2011. Вып. 2. 400 с.

12. Способ управления электромагнитными приводами контакторов / А.Ю. Гаврилов, Ю.М. Зайцев, И.П. Иванов и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 4. С. 32–36.
13. Устройство управления поляризованным электромагнитом / Н.Ю. Зайцев, Ю.М. Зайцев, С.П. Иванова и др. // Электротехника. 2023. № 8. С. 17–19.
14. Электронный блок управления двухобмоточной электромагнитной системой контактора / Г.П. Свинцов, С.П. Иванова, А.В. Михайлов и др. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2020. № 9. С. 26–31.
15. Chen W., Tang L. Closed-Loop Control System of a Contactor Based on Single-Board RIO. In: The proceedings of the 16<sup>th</sup> Annual Conf. of China Electrotechnical Society, LNEE, 2022, vol. 889, pp. 177–186. DOI: 10.1007/978-981-19-1528-4\_18.
16. Chi C.T. A Study of Closing Adaptive Control in Electronically Controlled Intelligent Contactor. In: IEEE Region 10 Conf., 2006. DOI: 10.1109/tencon.2006.34399.
17. De Moraes P.M. d. S.D., Perin A.J. An Electronic Control Unit for Reducing Contact Bounce in Electromagnetic Contactors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, iss. 2, pp. 861–870. DOI: 10.1109/TIE.2007.909073.
18. Fang S., Chen Y., Yang Y. Optimization design and energy-saving control strategy of high power dc contactor *Electrical Power and Energy Systems*, 2020, vol. 117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105633>.
19. Liu Y.-Y., Chen D., Ji L., Geng Y. Dynamic characteristic and contact bounce analysis for an AC contactor with PWM controlled coil. In: Electrical Contacts-2 Proc. of the 53<sup>rd</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2007, pp. 289–293. DOI: 10.1109/holm.2007.4318232.
20. Liu Y.-Y., Chen D., Niu C.-P., Ji L. Analysis and simulation of dynamic behavior and contact bounce for an intelligent contactor with feedback mechanism. In: Proc. of the CSEE, 2007, vol. 27(30), pp. 20–25.
21. Longfei T., Zhiping Han, Zhihong X. Neural Network-Based Co-Simulation Technology for Intelligent Contactors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, vol. 56, iss. 2. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2948318.
22. Park T.-H., Kim R.-Y., Lim S.-K. Two-level excitation current driver to reduce the driving power of an electromagnetic contactor. *Electronics*, 2024, vol. 13(5), 916. DOI: 10.3390/electronics13050916.
23. Rakhunde Prashant A., Singh J.K. Intelligent Contactor Coil Drive Design For Soft Switching Of Load With Power Saving. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 2017, vol. 5, iss. VI, pp. 1946–1951.
24. Sun S., Cui J., Du T. Research on the Influence of Vibrations on the Dynamic Characteristics of AC Contactors Based on Energy Analysis. *Energies*, 2020, no. 13(3), 559. DOI: 10.3390/en13030559.
25. Tomczuk B., Waindok A., Wajnert D. Transients in the electromagnetic actuator with the controlled supplier. *Journal of Vibroengineering*, 2012, vol. 14, iss. 1, pp. 39–44.

---

**ПЕТРОВ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (pvn.chuvsu@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2790-6390>).

**НИКОЛАЕВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ** – инженер по наладке и сервису 3-й категории, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (dimannikolaev11.2000@gmail.com).

**НИКИТИН ДИМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ** – инженер-программист отдела систем релейной защиты и автоматики, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (nikitin\_97\_97@mail.ru).

---

**Viktor N. PETROV, Dmitrii N. NIKOLAEV, Dimitrii N. NIKITIN**  
**EXPERIMENTAL STUDY OF OPTIMAL POWER CONSUMPTION**  
**CONTROL DEVICE FOR THE ELECTROMAGNETIC DRIVE OF A CONTACTOR**

**Key words:** *electromagnetic drive, control circuit, control device, contactor with electromagnetic drive, vacuum contactor, pulse-width modulation, microcontroller, control algorithm, control device prototype, winding voltage oscillogram, response time, response current, holding current, power consumption reduction, contact vibration.*

One of the priority scientific and technological directions of development of the Russian Federation in the field of energy, is energy and resource saving. In this regard, to ensure the competitiveness of the electrical products market, the issue of research and development of low-voltage electromagnetic switching equipment with low values of power consumption and weight and size indicators is relevant.

**The purpose of the study** is to reduce the power consumption of the electromagnetic drive of the contactor in the holding mode and to increase the electrical wear resistance of the main contacts of the contactor.

**Materials and methods.** The basis of the study was the analyzed existing solutions for the schemes and algorithms for controlling the electromagnetic drive in various sources of information. The electromagnetic drive of the vacuum contactor of the KBI-160 series was adopted as the initial object of the study. Main parameters of the electromagnetic drive of the contactor KBI-160: nominal control voltage of 220 V DC, winding resistance values preliminarily measured by the universal voltmeter ABM-4306 and the testing device PETOM-21 are 62 Ohm, the power consumption of the contactor electromagnet with a standard unit in the holding mode is 15.2 W. The research used the methods of analysis and synthesis, measurement, planning and conducting an experiment.

**Research results.** The paper presents the results of the development and study of a control device for electromagnetic drives, which ensures a decrease in the power consumption of the electromagnetic drive in the holding mode, as well as an increase in their electrical wear resistance. A control circuit for a single-winding electromagnetic drive is proposed. A brief description of the operation of the control device prototype based on a microcontroller is given. Experimental studies of the control device prototype are carried out using a three-stage electromagnetic drive control algorithm.

**Conclusions.** The results of the experimental studies showed the operability of the prototype sample of the contactor electromagnetic drive control device according to the proposed circuit. A reduction in the power consumption of the EMF in the holding mode was achieved, which amounted to 25 W. A slight (approximately 10%) reduction in the vibration time of the main contacts was ensured, which will lead to an increase in their electrical wear resistance.

## References

1. *Datchik toka ACS712. Tekhnicheskaya spetsifikatsiya* [Current sensor ACS712. Datasheet]. Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/837/DOC011837270.pdf> (Accessed Date: 2024, June 3).
2. *Kontaktor vakuumnyi KBI. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Vacuum contactor KBI. Operation manual]. Available at: <https://www.cheaz.ru/products/lve/contactors/vacuum/kv-1.html> (Accessed Date: 2024, June 3).
3. Konchenkov V.I., Skakunov V.N. *Semeistvo mikrokontrollerov STM32. Programirovanie i primeneniye: uchebnoe posobie* [STM32 Microcontroller Family. Programming and Application: Study guide]. Volgograd, Volgograd State Technical University Publ., 2015, 78 p.
4. *Mikrokontroller STM32F411CE6. Tekhnicheskaya spetsifikatsiya* [Microcontroller STM32F411CE6. Datasheet]. Available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers/microprocessors/stm32f411ce.html> (Accessed Date: 2024, June 3).
5. Zavarykin B.S., Kuz'min R.S., Men'shikov V.A., Gerasimov A.I. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov dlya elektromekhanicheskikh sistem gornykh predpriyatii* [Fundamentals of the theory of electrical apparatus for electromechanical systems of mining enterprises]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2014, 116 p.
6. Matveev M.N., Arzamasov V.L., Sergeev A.G. *Ustroistvo forsirovannogo upravleniya elektromagnitom postoyannogo toka* [Forced control device for direct current electromagnet]. Patent RF, no. 2310938, 2007.
7. Il'in V.F., Matveev N.V., Danilov N.V. *Ustroistvo upravleniya elektromagnitom* [Electromagnet control device]. Patent RF, no. 2349978, 2008.
8. Gavrilov A.Yu., Zaitsev M.Yu., Petrov V.N., Svintsov G.P. *Ustroistvo upravleniya elektromagnitom postoyannogo napryazheniya* [DC Electromagnet Control Device]. Patent RF, no. 2636052, 2017.
9. Ryumik S.M. *1000 i odna mikrokontrollernaya skhema* [1000 and one microcontroller circuit]. Moscow, DMK-Press Publ., 2016, iss. 3, 356 p.
10. Ryumik S.M. *1000 i odna mikrokontrollernaya skhema* [1000 and one microcontroller circuit]. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2010, iss. 1, 360 p.

11. Ryumik S.M. *1000 i odna mikrokontrollernaya skhema* [1000 and one microcontroller circuit]. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2011, iss. 2, 400 p.
12. Gavrilov A.Yu., Zaitsev Yu.M., Ivanov I.P. et al. *Sposob upravleniya elektromagnitnymi privodami kontaktorov* [Method of control of electromagnetic contactor drives]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2015, no. 4, pp. 32–36.
13. Zaitsev N.Yu., Zaitsev Yu.M., Ivanova S.P. et al. *Ustroistvo upravleniya polarizovannym elektromagnitom* [Polarized Electromagnet Control Device]. *Elektrotekhnika*, 2023, no. 8, pp. 17–19.
14. Svintsov G.P., Ivanova S.P., Mikhailov A.V. et al. *Elektronnyi blok upravleniya dvukhobmotchnoi elektromagnitnoi sistemoi kontaktora* [Electronic control unit for a two-winding electromagnetic contactor system]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2020, no. 9, pp. 26–31.
15. Chen W., Tang L. Closed-Loop Control System of a Contactor Based on Single-Board RIO. In: The proceedings of the 16<sup>th</sup> Annual Conf. of China Electrotechnical Society, LNEE, 2022, vol. 889, pp. 177–186. DOI: 10.1007/978-981-19-1528-4\_18.
16. Chi C.T. A Study of Closing Adaptive Control in Electronically Controlled Intelligent Contactor. In: IEEE Region 10 Conf., 2006. DOI: 10.1109/tencon.2006.34399.
17. De Moraes P.M. d. S.D., Perin A.J. An Electronic Control Unit for Reducing Contact Bounce in Electromagnetic Contactors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, iss. 2, pp. 861–870. DOI: 10.1109/TIE.2007.909073.
18. Fang S., Chen Y., Yang Y. Optimization design and energy-saving control strategy of high power dc contactor *Electrical Power and Energy Systems*, 2020, vol. 117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpjes.2019.105633>.
19. Liu Y.-Y., Chen D., Ji L., Geng Y. Dynamic characteristic and contact bounce analysis for an AC contactor with PWM controlled coil. In: Electrical Contacts-2 Proc. of the 53<sup>rd</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2007, pp. 289–293. DOI: 10.1109/holm.2007.4318232.
20. Liu Y.-Y., Chen D., Niu C.-P., Ji L. Analysis and simulation of dynamic behavior and contact bounce for an intelligent contactor with feedback mechanism. In: Proc. of the CSEE, 2007, vol. 27(30), pp. 20–25.
21. Longfei T., Zhiping Han, Zhihong X. Neural Network-Based Co-Simulation Technology for Intelligent Contactors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, vol. 56, iss. 2. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2948318.
22. Park T.-H., Kim R.-Y., Lim S.-K. Two-level excitation current driver to reduce the driving power of an electromagnetic contactor. *Electronics*, 2024, vol. 13(5), 916. DOI: 10.3390/electronics13050916.
23. Rakhunde Prashant A., Singh J. K. Intelligent Contactor Coil Drive Design For Soft Switching Of Load With Power Saving. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (JRASET)*, 2017, vol. 5, iss. VI, pp. 1946–1951.
24. Sun S., Cui J., Du T. Research on the Influence of Vibrations on the Dynamic Characteristics of AC Contactors Based on Energy Analysis. *Energies*, 2020, no. 13(3), 559. DOI: 10.3390/en13030559.
25. Tomczuk B., Waindok A., Wajnert D. Transients in the electromagnetic actuator with the controlled supplier. *Journal of Vibroengineering*, 2012, vol. 14, iss. 1, pp. 39–44.

---

**VIKTOR N. PETROV** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical and Electronic Devices, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (pvn.chuvsu@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2790-6390>).

**DMITRII N. NIKOLAEV** – Setup and Service Engineer of 3<sup>rd</sup> Categories, EKRA Ltd, Russia, Cheboksary (dimannikolaev11.2000@gmail.com).

**DIMITRII N. NIKITIN** – Software Engineer, Department of Relay Protection and Automation Systems, EKRA Ltd, Russia, Cheboksary (nikitin\_97\_97@mail.ru).

---

**Формат цитирования:** Петров В.Н., Николаев Д.Н., Никитин Д.Н. Экспериментальное исследование оптимального по потребляемой мощности устройства управления электромагнитным приводом контактора // Вестник Чувашского университета. 2024. № 4. С. 98–106. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-98-106.