

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса
(технические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2023-4-216-221

УДК 621.3

**Адаптивная система контроля технологического тока
при электромеханической обработке**

А. В. Морозов✉, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология производства и ремонт машин»

М. А. Карпенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства и ремонт машин»

И. Е. Никоноров, аспирант кафедры «Технология производства и ремонт машин»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1;

✉alvi.mor@mail.ru

Резюме. Исследования по возможности применения адаптивной системы контроля технологического тока при электромеханической обработке (ЭМО) проводили с целью разработки и создания цифрового прототипа установки для ЭМО деталей с адаптивной системой контроля технологического тока. Исследования включали в себя анализ средств автоматического регулирования и контроля мощности. В рамках теоретических исследований проводился синтез математических моделей функционирования устройств и их формализация, разработка алгоритмических моделей управления установки, включая алгоритмы регулировки мощности и анализа данных на основе математических моделей. Описывается функциональная схема установки, состоящая из блока логических операций, измерительного устройства, модуля анализа напряжения, регулятора напряжения и силового трансформатора. Произведен синтез передаточной функции $W(k)$ управляющего сигнала при цифроаналоговом управлении и разработана алгоритмическая модель адаптивной системы в программной платформе SimInTech. В результате проведения имитационного математического эксперимента была определена передаточная функция управляющего сигнала и представлена в виде графической зависимости $W(k)$, из которой видно, что полученная модель управляющего воздействия стабильна, так как время регулирования находится в пределе $0 \leq t \leq 4$ при степени затухания $\phi \geq 75\%$. В SimInTech была произведена генерация программного кода для микроконтроллера, который был загружен в прототип устройства управления установкой ЭМО.

Ключевые слова: электромеханическая обработка, силовой модуль, трансформатор, микроконтроллер, адаптивная система контроля, энергосбережение, качество обработки.

Для цитирования: Морозов А. В., Карпенко М. А., Никоноров И. Е. Адаптивная система контроля технологического тока при электромеханической обработке // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 4 (64). 216-221 С. doi:10.18286/1816-4501-2023-4-216-221.

Adaptive control system of process current during electromechanical processing

A. V. Morozov✉, **M. A. Karpenko**, **I. E. Nikonorov**

FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University

432017, Ulyanovsk, Novyi Venets boulevard, 1;

✉alvi.mor@mail.ru

Abstract. Research on the possibility of using an adaptive control system of process current during electromechanical processing (EMP) was carried out with the aim of developing and creating a digital prototype of a device for EMP of parts with an adaptive control system of process current. The research included an analysis of automatic power regulation and control. As part of theoretical research, the synthesis of mathematical models of functioning of the devices and their formalization, development of algorithmic models for device control, including algorithms for power control and data analysis based on mathematical models were carried out. The functional diagram of the device is described, consisting of a logical operation block, a measuring device, a voltage analysis module, a voltage regulator and a power transformer. The transfer function $W(k)$ of the control signal was synthesized using digital-analogue control and an algorithmic model of the adaptive system was developed on the SimInTech software platform. As a result of simulation of mathematical experiment, the transfer function of the control signal was determined and presented in the form of a graphical dependence $W(k)$, which shows that the resulting model of the control action is stable, since the control time

is in the limit $0 \leq t \leq 4$ with a degree of attenuation $\varphi \geq 75\%$. SimInTech generated a program code for the microcontroller, which was loaded into a prototype control device for the EMP device.

Keywords: electromechanical processing, power module, transformer, microcontroller, adaptive control system, energy saving, processing quality.

For citation: Morozov A. V., Karpenko M. A., Nikonorov I. E. Adaptive control system of process current during electro-mechanical processing // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2023;4(64): 216-221 doi:10.18286/1816-4501-2023-4-216-221.

Введение

В условиях санкций сельское хозяйство стоит перед необходимостью оптимизации ресурсов и повышения эффективности производства. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники становится важным направлением для увеличения долговечности и надежности сельскохозяйственных машин, что может существенно сэкономить средства в условиях ограниченного доступа к импортным компонентам.

Электромеханическая обработка – перспективная технология, использование которой, позволит сельскохозяйственным предприятиям значительно снизить расходы на замену изношенных деталей и обслуживание сельскохозяйственной техники. Это также способствует улучшению конкурентоспособности продукции на рынке и снижению зависимости от импортных аналогов [1, 2, 3, 4, 5].

Для повышения износостойкости и долговечности деталей на практике применяются различные технологические установки довольно простого исполнения [1, 2, 3, 6]. Типовая установка для ЭМО состоит из следующих неотъемлемых частей: источник электропитания установки (силовой модуль), электрической шины, регулировочного устройства, контактный инструмент, агрегатная основа (станок).

При этом в зависимости от параметров источника тока или требуемых режимов работы состав применяемого оборудования может меняться, на что технология не накладывает жестких ограничений [1, 2]. Вследствие вышесказанного данные установки не отличаются технологичностью исполнения и часто включают в свой состав изначально непредназначенные под данные режимы работы компоненты, такие как мощные сварочные трансформаторы, балластные реостаты, составные электрические шины (проводники сечения более 30 мм²).

Анализ существующих и разрабатываемых силовых модулей ЭМО показал, что практически все силовые модули имеют ручное управление [1, 2, 3, 7, что требует постоянный контроль со стороны оператора, неудобство, длительность и неточность регулировки мощности источника питания, аналоговые измерительные приборы – амперметры вследствие скачков могут выдавать неточные данные или показания могут изменяться скачкообразно, делая невозможным оперативную регулировку мощности, что влияет на качество обработанной поверхности [8, 9, 10, 11].

Описанные выше недостатки применяемых силовых установок являются достаточным аргументом в пользу разработки прототипа с целью повышения качества обработанной поверхности и экономии электроэнергии.

Целью исследований является разработка и создание прототипа установки для электромеханической обработки деталей с адаптивной системой контроля технологического тока. Эта система предназначена для повышения эффективности и точности процесса обработки деталей, а также для автоматизации управления мощностью трансформатора, что способствует улучшению качества и долговечности обрабатываемых изделий.

Главная идея концепции заключается в автоматизации процесса электромеханической обработки. Автоматический контроль мощности установки с возможностью перехода на ручной режим управления является основой для повышения качества работы, при этом становится возможным использование специализированных электроустановок меньших габаритов, так как они зачастую требуют особых режимов работы, которые могут быть воплощены в проектируемой силовой установке. Непосредственно автоматизация процесса будет связана с использованием микроконтроллера и программного управления, что делает возможным задание различных алгоритмов работы установки без изменения принципиальной схемы и использования громоздкого оборудования [12, 13, 14]. Так как цифровые приборы по габаритам во много раз компактней аналоговых, а также там, где возможно программное управление, реализация подобных схем на аналоговых компонентах потребует значительного пространства и количества этих компонентов, и сложность принципиальной схемы, так же будет отличаться в большую сторону [15].

Материалы и методы

В данной работе проводится разработка и исследование автоматизированной установки для ЭМО деталей машин с автоматическим контролем мощности. Исследования включали в себя следующие этапы:

1. Разработка концепции установки и анализ средств автоматического регулирования и контроля мощности.

2. Математическое моделирование. В рамках теоретических исследований проводилась разработка математических моделей функционирования устройств, таких как трансформатор тока и регулятор

напряжения, с учетом их технических характеристик и параметров работы.

3. Разработка алгоритмов управления установки, включая алгоритмы регулировки мощности и анализа данных на основе математических моделей.

4. Оценка эффективности разрабатываемой установки на основе результатов математического моделирования и анализа технических характеристик.

Результаты

На рисунке 1 приведена функциональная схема силового модуля установки ЭМО.

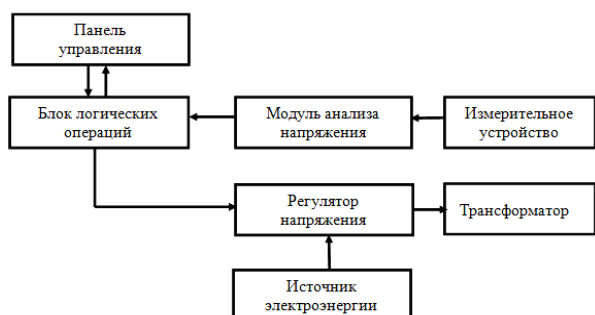


Рис. 1. Функциональная схема силового модуля установки ЭМО

Блок логических операций предназначен для сбора и обработки информации, а также подачи команд на управляемые устройства согласно заложенной программе.

Измерительное устройство необходимо для замера текущего сопротивления в зоне контакта обрабатываемого инструмента с деталью, он представляет собой катушку индуктивности вокруг одной из шин, проходящей от трансформатора к инструменту, проходящий по шине ток наводит индукционный ток в катушке [15].

Модуль анализа напряжения переводит наведенное в катушке напряжение в цифровой формат и отправляет на блок логических операций.

Регулятор напряжения по команде с блока логических операций увеличивает или уменьшает подачу электроэнергии на трансформатор.

Собственно трансформатор преобразует стандартное сетевое напряжение в напряжение с необходимыми характеристиками для реализации технологического процесса.

Блок логических операций имеет ряд контактов для подключения программатора для смены управляющей программы, а также располагаются незадействованные контакты, которые могут быть использованы для подключения дополнительных датчиков.

Обратная связь представляет собой трансформатор тока, сигнал с которого поступает на блок логических операций, где анализируется и синтезируется управляющий сигнал.

Управляющий сигнал поступает на вход силовых цепей, представленных оптосимисторным преобразователем (оптодрайвером) (рис.2) и симисторным ключом (рис. 3).

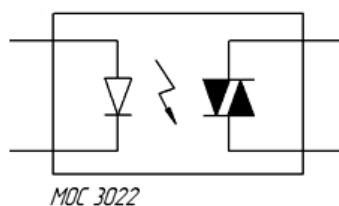


Рис. 2. Схематическое обозначение оптодрайвера

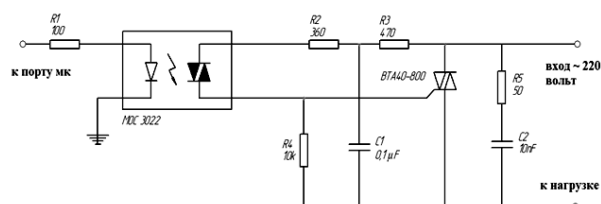


Рис. 3. Схема управления симистором

Передаточная функция управляющего сигнала при цифроаналоговом управлении будет иметь следующий вид:

$$W_{ЭМО}(s) = \frac{K}{(1 + I_1s)(1 + I_2s)}, \quad (1)$$

при $T_2 \geq T_1$,

$$W_{ЭМО}(s) = \frac{K}{(1 + Is)} e^{-\tau_{зап}s}, \quad (2)$$

где: $W_{ЭМО}$ – передаточная функция; s – оператор Лапласа; $\tau_{зап}$ – время запаздывания, с; K – передаточный коэффициент датчика тока Т2.

Схема преобразователя тока представлена на рисунке 4.

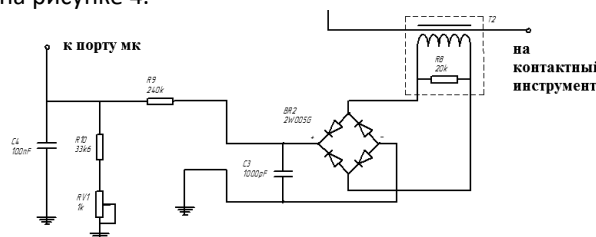


Рис. 4. Схема преобразователя тока

$$K = \frac{I_2(s)}{U_1(s)} \quad (3)$$

Ток I_2 , протекающий по вторичной обмотке трансформатора преобразуется, в результате чего

с первичной обмотки снимается напряжение U_1 , которое гасится на резисторе R_8 и выпрямляется на диодном мосте BR_2 , далее подаётся на фильтр, состоящий из конденсаторов C_3, C_4 , резисторов R_9, R_{10} и потенциометра RV_1 .

Далее сигнал подаётся на микроконтроллер МК, который формирует алгоритм управления. МК вычисляет очередное значение кода управляющего воздействия, которое зависит от сложности модели объекта управления, а также от требований к точности отработки задающего воздействия и качеству переходного процесса.

Алгоритмическая модель адаптивной системы (рис. 5) реализована в программной платформе *SimInTech* для разработки математических моделей, алгоритмов управления, мнемосхем и видеокадров, обладающая возможностью автоматической генерации кода для программируемых контроллеров [16].

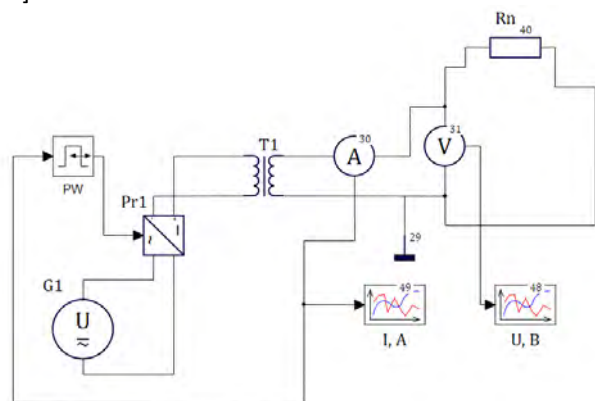


Рис. 5. Алгоритмическая модель адаптивной системы:

$G1$ – генератор напряжения (промышленная сеть), PW – микроконтроллер, $Pr1$ – силовой преобразователь IGBT, $T1$ – силовой трансформатор, A – датчик тока, V – датчик напряжения, Rn – нагрузка (инструмент ЭМО)

В результате проведения имитационного математического эксперимента была определена передаточная функция управляющего сигнала при цифроаналоговом управлении и представлена в виде графической зависимости $W(k)$ (рис. 6).

Анализируя график, можно сделать вывод, что полученная модель управляющего воздействия стабильна, так как время регулирования находится в пределе $0 \leq t \leq 4$ при степени затухания $\varphi \geq 75\%$.

Далее в *SimInTech* была произведена генерация программного кода для микроконтроллера,

Литература

1. Аскинази, Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.
2. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация / В. П. Багмутов, С. Н. Паршев и др. Новосибирск: Наука, 2003. 318с.
3. Федоров С. К. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственной техники электромеханической обработкой: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / Федоров Сергей Константинович. - Москва, 2009. – 245 с.

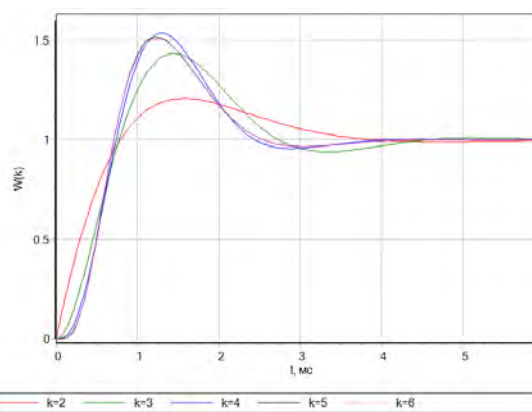


Рис. 6. Передаточная функция управляющего сигнала $W(k)$

который будет загружаться при реализации адаптивной системы управления установкой ЭМО.

Обсуждение

Представлена разработка и исследование автоматизированной установки для электромеханической обработки деталей машин с автоматическим контролем мощности.

Разработанная установка и методика могут найти практическое применение в различных областях, где требуется эффективная и точная электромеханическая обработка деталей машин.

Важным направлением для будущих исследований может быть расширение функциональности установки и оптимизация алгоритмов управления для более широкого спектра задач.

Заключение

Разработанная установка для электромеханической обработки деталей с адаптивной системой контроля технологического тока представляет собой важное техническое решение, способное повысить эффективность производственных процессов. Эта система автоматизирует управление мощностью трансформатора, обеспечивая точность и стабильность обработки деталей.

Применение данной установки позволит повысить производительность обработки, стабильность эксплуатационных свойств обработанных деталей и соответственно их долговечность.

Таким образом, данное исследование вносит важный вклад в развитие автоматизированных систем для электромеханической обработки и открывает новые перспективы для сельского хозяйства и промышленности в условиях современных вызовов и ограничений.

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4. Повышение износостойкости втулок защитных консольных насосов электромеханической поверхностной за-
калкой / Л. В. Федорова, В. Т. Нго, Ю. С. Иванова и др. // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2022. Т. 24. №1. С. 55-59
5. Повышение результативности научно-технических разработок для органического земледелия / Б. Г. Зиганшин,
Н. И. Сёмушкин, Д. Н. Сёмушкин и др. // Вестник Казанского ГАУ. 2023. № 3 (71). 84-91. doi 10.12737/2073-0462-2023-
84-91.
6. Морозов А. В., Никоноров И. Е., Шапуков Н. И. Анализ силовых установок для электромеханической обра-
ботки // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: материалы Национальной научно-практической
конференции с международным участием, посвященной 80-летию Ульяновского государственного аграрного
университета имени П.А. Столыпина, 2022. С. 880-883.
7. Надольский О. В., Яковлев С. А. Исследование электрических потенциалов в рабочем контуре при элек-
тромеханической обработке // Сборник научных трудов УГСХА. Ульяновск: ГСХА, 1997. С. 108-113.
8. Яковлев, С. А. Технологическое обеспечение качества электромеханической обработки деталей при ре-
монте сельскохозяйственных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 4.3.1.Яковлев Сергей Александрович. Чебоксары, 2023.
329 с.
9. Пат. 2786552. Российская федерация, МПК В 24 В 39/04 (2006.01), В 23 Р 6/00 (2006.01), С 21 D 7/13
(2006.01), СПК В 24 В 39/04 (2022.08). Установка для электромеханической обработки / А. В. Морозов, А. А.
Кнуров, И. Е. Никоноров, А. А. Морозов, Ю. В. Яшина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ.
Заявка № 2022126407; от 10.10.2022; опубл. 22.12.2022, Бюл. № 36.
10. Пат. 2794275. Российская федерация, МПК В 24 В 39/00 (2006.01), С 21 D 7/13 (2006.01), СПК В 24 В 39/00
(2023.02), С 21 D 7/13 (2023.02). Установка для электромеханической обработки / А. В. Морозов, А. А. Кнуров, И.
Е. Никоноров, А. А. Морозов, Ю. В. Яшина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ. Заявка
№ 2022129643; от 15.11.2022; опубл. 13.04.2023, Бюл. № 11.
11. Компьютерное управление процессом и стабилизация формирования соединений при контактной то-
чной сварке: дис. ... к-та техн. наук: 05.02.10 / Герасимов Александр Анатольевич. Волгоград, 2010. 214 с.
12. Подола Н. В., Руденко П. М., Гавриш В. С. Применение адаптивного алгоритма для контроля качества
сварки в системах управления контактными точечными машинами // Автоматическая сварка. 2004. № 6. С. 15-18.
13. Параметрическая стабилизация контактной сварки / А. С. Климов и др. // Проблемы машиностроения и
автоматизации. 2010. № 2. С. 104-109.
14. Теория электрических аппаратов / Г. Н. Александров, В. В. Борисов, В. Л. Иванов и др. / Под ред. Г. Н.
Александрова. М.: Высшая школа, 1985. 312 с.
15. Дастин Э. Тестирование программного обеспечения. Внедрение, управление и автоматизация / Э.
Дастин, Д. Рэшка, Д. Пол; Пер. с англ. М. Павлов. М.: Лори, 2017. 567 с.
16. Гайдук А. Р., Пьявченко Т. А. Применение программного пакета SimInTech для изучения теории автома-
тического управления. Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного фе-
дерального университета. 2021. 131 с.

References

1. Askinazi B. M. Strengthening and restoration of parts by electromechanical processing. 3rd ed., revised and add.
M.: Mechanical Engineering, 1989. 200 p.
2. Electromechanical processing: technological and physical foundations, properties, implementation. Bagmutov V.
P., Parshev S. N., et al. Novosibirsk: Nauka, 2003. 318 p.
3. Fedorov S. K. Increase of durability of agricultural machinery parts by electromechanical processing: dis. of Dr.
of Tech. Sciences: 05.20.03 / Fedorov Sergey Konstantinovich. Moscow, 2009. 245 p.
4. Fedorova L.V. Increased wear resistance of bushings of protective cantilever pumps by electromechanical surface
hardening / L. V. Fedorova, V. T. Ngo, Yu. S. Ivanova, et al. // Vestnik of the Federal State Educational Institution of Higher
Professional Education MSAU. 2022. Vol. 24. № 1. P. 55-59
5. Increase of the effectiveness of scientific and technical developments for organic farming / B. G. Ziganshin, N. I.
Syomushkin, D. N. Syomushkin, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2023. № 3 (71). 84-91. doi
10.12737/2073-0462-2023-84-91.
6. Analysis of power plants for electromechanical processing / Morozov A. V., Nikonorov I. E., Shamukov N. I. //
Science in modern conditions: from idea to implementation: materials of the National scientific and practical conference
with international participation, dedicated to 80th anniversary of Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A.
Stolypin, 2022. P. 880-883.
7. Nadolsky V. O., Yakovlev S. A. Study of electrical potentials in the working circuit during electromechanical pro-
cessing // Collection of scientific papers of USAA. Ulyanovsk: State Agricultural Academy, 1997. P. 108-113.
8. Yakovlev S.A. Technological assurance of the quality of electromechanical processing of parts during the repair
of agricultural machines: dissertation of Doctor of Engineering Sciences: 4.3.1 / Yakovlev Sergey Aleksandrovich. - Che-
boksary, 2023. 329 p.

9. Pat. 2786552. Russian Federation, IPC B 24 B 39/04 (2006.01), B 23 P 6/00 (2006.01), C 21 D 7/13 (2006.01), SPK B 24 B 39/04 (2022.08). Installation for electromechanical processing / A. V. Morozov, A. A. Knyurov, I. E. Nikonorov, A. A. Morozov, Yu. V. Yashina; applicant and patent holder FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University. Application № 2022126407; dated 10.10.2022; publ. 22.12.2022, Bul. № 36.

10. Pat. 2794275. Russian Federation, IPC B 24 B 39/00 (2006.01), C 21 D 7/13 (2006.01), SPK B 24 B 39/00 (2023.02), C 21 D 7/13 (2023.02). Installation for electromechanical processing / A.V. Morozov, A. A. Knyurov, I. E. Nikonorov, A. A. Morozov, Yu. V. Yashina; applicant and patent holder FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University. – Application № 2022129643; dated 15.11.2022; publ. 13.04.2023, Bul. № 11.

11. Computer control of the process and stabilization of formation of joints during resistance spot welding: dissertation of candidate of technical Sciences: 05.02.10 / Gerasimov Alexander Anatolevich. Volgograd, 2010. 214 p.

12. Podola N. V., Rudenko P. M., Gavrish V. S. Application of an adaptive algorithm for welding quality control in control systems for contact point machines // Automatic welding. 2004. № 6. P. 15-18.

13. Parametric stabilization of contact welding / A.S. Klimov et al. // Problems of mechanical engineering and automation. 2010. № 2. P. 104-109.

14. Theory of electrical devices / G. N. Aleksandrov, V. V. Borisov, V. L. Ivanov, et al. / Ed. by G.N. Alexandrov. M.: Higher School, 1985. 312 p.

15. Dustin E. Software testing. Implementation, management and automation / E. Dustin, D. Reshka, D. Paul; Translated from English by M. Pavlov. M.: Lori, 2017. 567 p.

16. Gaiduk A. R., Pyavchenko T. A. Application of the SimInTech software package for studying the theory of automatic control / Southern Federal University. Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Publishing House, 2021. 131 p.