




ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-262>

УДК 621.833:622.232.8

**Мехатронная система для обкатки и испытаний механических передач карьерных экскаваторов**С. И. Малафеев^{1,2}  , А. А. Малафеева³  , В. И. Коняшин¹  , А. А. Новгородов¹  ¹ ООО «Компания «Объединенная Энергия», г. Москва, Российская Федерация² Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация³ Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Владимирский филиал), г. Владимир, Российская Федерация simalafeev@gmail.com**Аннотация**

Механические передачи подъемных и тяговых лебедок, а также механизмы напора карьерных экскаваторов находятся под действием наибольших знакопеременных ударных нагрузок. Поэтому к качеству изготовления механических передач предъявляются повышенные требования. Процесс управления жизненным циклом редукторов включает обкатку и испытания нового изделия на предприятии, диагностику и контроль в процессе эксплуатации. Стенды для этих целей должны обеспечивать максимальное соответствие режимов испытаний условиям эксплуатации механической передачи. Разработанный стенд предназначен для обкатки (приработки сопряженных соединений) и контроля качества изготовления и сборки редукторов лебедок подъема и напора электрических карьерных экскаваторов ЭКГ-8ус, ЭКГ-10, ЭКГ-12К, ЭКГ-15М, ЭКГ-18, ЭКГ-20КМ, ЭКГ-32Р в условиях приемо-сдаточных испытаний. В стенде применены двигатели экскаваторные постоянного тока мощностью 350 кВт (приводные машины) и мощностью 560 кВт (нагружающая машина). В качестве мультипликатора использован редуктор лебедки подъема экскаватора ЭКГ-15М. Два промежуточных вала объединены промежуточной вставкой. Нагружающий двигатель соединен с одним валом. Для управления двигателями используются типовые транзисторные преобразователи постоянного тока с широтно-импульсным регулированием, применяемые на экскаваторах с главными приводами постоянного тока. Обкатка и испытания редукторов проводятся методом взаимной нагрузки. Программное обеспечение испытательного стенда реализовано на основе информационно-диагностической системы Пульсар-7. При этом обеспечиваются следующие режимы работы: 1. Интерактивное управление компонентами стенда в ручном режиме. В этом режиме оператор может проверять функционирование компонентов стенда, выполнять их настройку. 2. Автоматическое управление процессом обкатки испытаний. Подпрограммы из имеющейся библиотеки обеспечивают формирование требуемых в соответствии с видом испытания последовательностей управляющих команд. Предусмотрены режимы обкатки без нагрузки, с постоянной нагрузкой, переменными нагрузкой и угловой скоростью, воспроизведения цикла экскавации. В процессе испытания производится автоматическое создание протокола по испытываемому изделию. 3. Формирование протоколов испытания. Оператор может просматривать и выводить на печать любые ранее сформированные протоколы. 4. Настройка программы и вспомогательные функции, в том числе справочная подсистема. На основе составленного математического описания мехатронных систем выполнено исследование процессов при обкатке редуктора напора ЭКГ-15Мс помощью Simulink. Разработанный стенд реализован в ООО Компания «Объединенная Энергия» и внедрен в ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова».

Ключевые слова




горные машины, мехатроника, экскаватор, редуктор, обкатка, испытание, моделирование, регулирование, система, стенд

Для цитированияMalafeev S. I., Malafeeva A. A., Konyashin V. I., Novgorodov A. A. Mechatronic system for running-in and testing of mechanical transmissions in mining shovels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):75–83. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-262>



POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Mechatronic system for running-in and testing of mechanical transmissions in mining shovelsS. I. Malafeev^{1,2}  , A. A. Malafeeva³  , V. I. Konyashin¹  , A. A. Novgorodov¹  ¹ Joint Power Co., Ltd., Moscow, Russian Federation² Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov, Vladimir, Russian Federation³ Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Vladimir Branch), Vladimir, Russian Federation simalafeev@gmail.com**Abstract**

The mechanical transmissions of the hoist and drag winches, as well as the crowd mechanisms of mining shovels, operate under highly variable and shock cyclic loads. These severe operating conditions impose stringent quality requirements on both the manufacturing and assembly of such transmissions. The lifecycle management process for these gearboxes includes running-in and acceptance testing at the manufacturing plant, followed by diagnostics and condition monitoring during field operation. Test benches designed for these purposes must closely replicate the operating conditions experienced by the transmission in actual service. The developed test bench is designed to perform running-in (initial wear-in of mating surfaces) and quality control testing of hoist and crowd winch gearboxes installed in electric mining shovels of the following models: EKG-8US, EKG-10, EKG-12K, EKG-15M, EKG-18, EKG-20KM, and EKG-32R. These operations are carried out as part of the standard acceptance testing procedure. The test bench is equipped with DC excavator motors rated at 350 kW (drive motors) and 560 kW (loading motor). The hoist winch gearbox from the EKG-15M shovel serves as the torque multiplier. Two intermediate shafts are connected via an intermediate coupling, with the loading motor driving one of these shafts. Motor control is implemented using standard DC transistor converters with PWM control, identical to those used in mining shovels equipped with DC main drives. The running-in and testing processes are carried out using the mutual loading method, which enhances energy efficiency by allowing regenerative energy to be reused within the system. The test bench software is based on the Pulsar-7 information and diagnostics system, which supports the following operational modes: 1. Interactive manual control, enabling the operator to verify the functionality and calibration of test bench components. 2. Automatic control of the running-in and testing processes, where pre-programmed sequences from a built-in library generate the required control commands for each specific test type. Available test modes include: unloaded running-in, running-in under constant load, running-in under variable load and rotational speed, excavation cycle simulation. 3. Automated test report generation, including the ability to view and print previously generated reports. 4. Software configuration and auxiliary functions, including an embedded help system. A mathematical model of the mechatronic system was developed and used to simulate the running-in process of the EKG-15M crowd gearbox in Simulink. The developed test bench system has been successfully implemented at Joint Power Co., Ltd. (Moscow) and IZ-KARTEX named after P.G. Korobkov.

Keywords

mining machinery, mechatronics, shovel, gearbox, running-in, testing, simulation, control, system, test bench

For citation

Malafeev S. I., Malafeeva A. A., Konyashin V. I., Novgorodov A. A. Mechatronic system for running-in and testing of mechanical transmissions in mining shovels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):75–83. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-262>

Введение

Механические передачи карьерных экскаваторов и другой горной техники относятся к компонентам, оказывающим значительное влияние на надежность и эффективность работы машин [1, 2]. Редукторы подъемных и тяговых лебедок, а также механизмы напора при работе экскаваторов находятся под действием наибольших знакопеременных ударных нагрузок. Это служит причиной износа элементов редукторов. Поэтому к качеству изготовления механических передач предъявляются повышенные требования [3]. Процесс управления жизненным циклом редукто-

ров включает обкатку и испытания нового изделия на предприятии, диагностику и контроль в процессе эксплуатации [4, 5]. Перспективное внедрение технологии цифровых двойников предусматривает создание моделей передач и их верификацию при обкатке и приемо-сдаточных испытаниях [6].

Обкатка редукторов проводится для приработки деталей, выявления дефектов сборки и монтажа, регулировки сборочных единиц и агрегатов, что способствует повышению срока их эксплуатации [7, 8]. Приработка играет важную роль в установившейся работе механических компонентов. Это переходный процесс,



включающий сложное взаимодействие между трением, смазкой, неровностями, пластической деформацией и износом [9, 10]. Процесс приработки включает в себя изменение важнейших трибологических параметров, таких как шероховатость поверхности, рисунок поверхности, коэффициент трения и скорость износа, до тех пор пока не будет преобладать установившийся режим [11, 12]. Достигнутое в процессе приработки состояние трибокомпонента определяет его характеристики в условиях эксплуатации [13]. Режим обкатки разрабатывается индивидуально для каждого типа редуктора. При этом обкатку производят последовательно при различных режимах: от холостого хода до номинальной нагрузки при различных скоростях и направлениях вращения [14, 15]. Продолжительность процесса обкатки и испытаний зависит от особенностей изделия.

Стендовое оборудование для обкатки и испытаний должно обеспечивать реализацию всех тестовых режимов, автоматизацию проведения экспериментов и обработки результатов, а также минимальные энергетические затраты [14, 15]. Стенды должны обеспечивать максимальное соответствие режима испытаний условиям эксплуатации механической передачи. В настоящее время для испытаний наибольшее применение нашел метод взаимной нагрузки электрических машин, валы которых соединены через редуктор и мультипликатор [16]. В этом случае используются идентичные приводные электрические двигатели и механические передачи (редуктор и мультипликатор). В условиях предприятия, выпускающего различные изделия, актуальной является задача испытаний редукторов с разными передаточными числами¹.

В настоящей работе рассматриваются выполненные в Компании «Объединенная Энергия», г. Москва, проектирование и внедрение автоматизированной системы для обкатки и испытаний редукторов подъема и напора карьерных экскаваторов.

Цели и задачи

Цель исследования – анализ, синтез и моделирование стендового оборудования для обкатки и испытаний механических передач главных приводов карьерных электрических экскаваторов.

Основные задачи:

1) разработка функциональных схем испытательных стендов для обкатки редукторов приводов подъема и напора карьерных экскаваторов, эффективных для механических передач различных экскаваторов с разными передаточными числами;

2) составление и анализ математического описания мехатронных систем стендов для обкатки редукторов одно- и двухдвигательных приводов при использовании метода взаимной нагрузки;

3) исследование моделей мехатронных систем стендов с помощью MATLAB-Simulink;

4) практическая реализация мехатронных систем для стенда в ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П. Г. Коробкова».

1. Функциональная схема системы

Функциональная схема мехатронной системы для обкатки редукторов двухдвигательного привода подъема показана на рис. 1. Электропитание мехатронной системы осуществляется от цеховой сети 0,4 кВ с помощью автоматического выключателя QF, силового трансформатора Т и диодного выпрямителя В. В звене постоянного тока используется конденсатор С. Испытуемый редуктор приводится во вращение с помощью двух двигателей постоянного тока М1 и М2. Тихоходный вал редуктора Р через мультипликатор МП соединен с валом нагружающего двигателя М3. Управление двигателями М1, М2 и М3 осуществляется путем регулирования напряжения на якорных обмотках с помощью транзисторных мостовых преобразователей соответственно ТП1, ТП2 и ТП3. Обмотки возбуждения двигателей соединены последовательно и подключены в выходу транзисторного преобразователя ТПВ. Транзисторный ключ ТК с балластным резистором R предназначены для аварийного сброса энергии в звене постоянного тока. Для измерения моментов на валах двигателей используются моментные муфты ММ1 и ММ2. Управление процессом испытаний осуществляется с помощью специального компьютера (ПК оператора). Программы и результаты испытаний хранятся на сервере.

В стенде применены силовое оборудование и информационная управляющая система, разработанные для карьерных экскаваторов с приводами главного движения постоянного тока и транзисторными преобразователями энергии [17].

Обкатка и испытания редукторов проводятся методом взаимной нагрузки. Силовые электропитающие входы транзисторных преобразователей ТП1, ..., ТП3 соединены параллельно и подключены к звену постоянного тока. Обмотки возбуждения электрических машин подключены к выходу ТПВ, работающего в режиме стабилизации тока. Электрические машины М1 и М2 работают в режиме двигателей. Система управления двигателями двухконтурная с подчиненным контуром тока и главным контуром напряжения [17, 18]. Для стабилизации угловой скорости используется положительная обратная связь по току якорной обмотки. При этом один двигатель является ведущим, второй ведомым. Машина М3 работает в режиме генератора при стабилизации якорного тока. Точки отбора энергии от звена постоянного тока для приводов совпадают, а из сети потребляется мощность, равная потерям в электрических машинах и транзисторных преобразователях. При обкатке и испытаниях редукторов напора используется один приводной двигатель, например, М1.

Представленная на рис. 1 структура испытательного стенда позволяет проводить обкатку и испытания редукторов с различными передаточными числами с использованием одного стационарного мультипликатора.

¹ Малафеев С. И. Патент РФ № 2779712. МПК G01R31/34. Стенд для испытания электрических машин постоянного тока и механических передач. Опубл. 12.09.2022. Бюл. № 26.

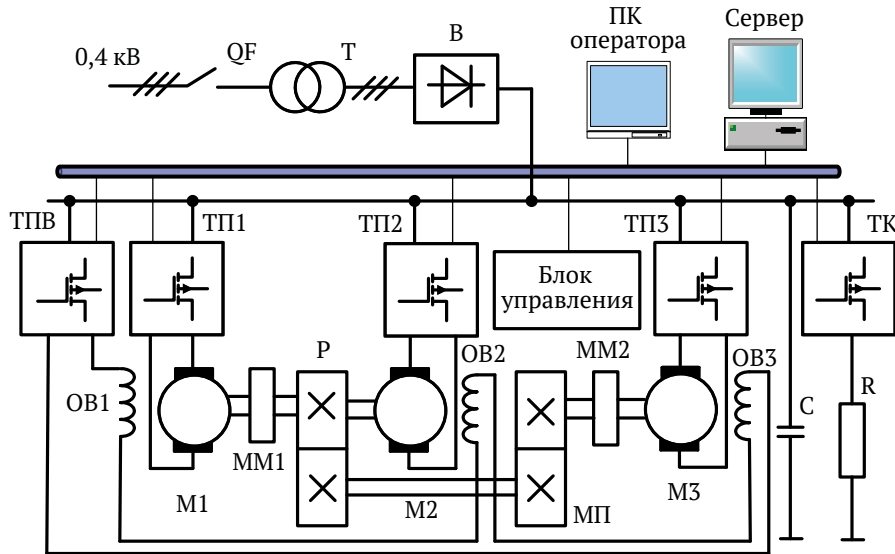


Рис. 1. Функциональная схема мехатронной системы стенда обкатки редукторов подъема: SQ – автоматический выключатель; Т1 – силовой трансформатор; В – выпрямитель; ТПВ, ТП1, ..., ТП3 – транзисторные мостовые преобразователи постоянного тока; ТК – транзисторный ключ; С – ёмкость звена постоянного тока; R – балластный резистор; M1 – нагружающий двигатель постоянного тока; M2, M3 – приводные двигатели постоянного тока; ОВ1, ..., ОВ3 – обмотки возбуждения двигателей соответственно M1, M2, M3; МП – мультипликатор; P – испытуемый редуктор; MM1, MM2 – измерительные моментные муфты

2. Анализ мехатронной системы стенда

Структурная схема модели мехатронной системы стенда показана на рис. 2. На схеме обозначено: ТП1, ТП2, ТП3 – транзисторные преобразователи управления двигателями; ДТ1, ДТ2, ДТ3 – датчики тока якорных цепей двигателей постоянного тока; РТ1, РТ2, РТ3 – регуляторы тока; РН – регулятор напряжения; ОТ – блок ограничения тока; ЗИ1, ЗИ2 – задатчики интенсивности; $H_{п1}(s)$, $H_{п2}(s)$, $H_{п3}(s)$ – передаточные функции транзисторных преобразователей управления машинами постоянного тока соответственно M1, M2, M3; $H_{т1}(s)$, $H_{т2}(s)$, $H_{т3}(s)$ – передаточные функции регуляторов тока; $H_n(s)$ – передаточная функция регулятора напряжения в системе регулирования угловой скорости; k_k – коэффициент передачи корректирующей положительной связи по току; $H_\phi(s)$ – передаточная функция фильтра в контуре регулирования напряжения; r_1, r_2, r_3 – активные сопротивления якорных обмоток двигателей постоянного тока; L_1, L_2, L_3 – индуктивности якорных обмоток двигателей постоянного тока; c_1, c_2, c_3 – конструктивные постоянные двигателей постоянного тока; k_{i1}, k_{i2}, k_{i3} – коэффициенты датчиков тока соответственно ДТ1, ДТ2 и ДТ3; k_u – коэффициент передачи датчика напряжения; J_1 – приведенный к валу приводного двигателя момент инерции вращающихся масс; J_2 – приведенный к валу нагружающей машины момент инерции; k_{m1} и k_{m2} – коэффициенты передачи соответственно редуктора и мультипликатора; c_{12} – жесткость механической связи; $k_{в1}, k_{в2}$ – коэффициенты вязкого трения, моделирующие потери в механических передачах; U_1, U_2, U_3 – напряжения на якорных обмотках электрических

машин; i_1, i_2, i_3 – токи якорных обмоток электрических машин; Ω_1 и Ω_2 – угловые скорости соответственно приводных двигателей и нагружающей машины; φ_1 и φ_2 – углы поворотов выходного вала редуктора и входного вала мультипликатора; M_1 и M_2 – электромагнитные моменты первого и второго приводных двигателей; M – крутящий момент на выходном валу редуктора; $u_{\omega c}$ – напряжение задания угловой скорости приводных двигателей; u_{τ} – напряжение задания момента нагрузки (тока якорной обмотки нагружающей машины). Для транзисторных преобразователей $H_{п1}(s) = k_{п1}$, $H_{п2}(s) = k_{п2}$, $H_{п3}(s) = k_{п3}$, где $k_{п1}, k_{п2}, k_{п3}$ – коэффициенты передачи. В системе управления используется пропорциональный регулятор напряжения с коэффициентом передачи k_n , т.е. $H_n(s) = k_n$, и апериодический фильтр

$$H_\phi(s) = \frac{k_\phi}{k_\phi s + 1},$$

где k_ϕ и T_ϕ – коэффициент передачи и постоянная времени фильтра. В качестве регуляторов тока используются пропорционально-интегральные регуляторы.

В двухдвигательном приводе используются идентичные электрические машины. Поэтому $H_{п1}(s) \approx H_{п2}(s)$; $H_{т1}(s) \approx H_{т2}(s)$; $r_1 \approx r_2$; $L_1 \approx L_2$; $c_1 \approx c_2$; $k_{т1} \approx k_{т2}$. В схеме испытания редукторов напора используется один приводной двигатель (рис. 3).

Мощность, потребляемая из сети при установившемся режиме обкатки, равна суммарной мощности потерь в силовых компонентах системы. Для схемы на рис. 2 эта мощность равна:

$$P_c = \Delta P_T + \Delta P_B + P_K + \sum_{i=1}^3 \Delta P_{Mi} + \sum_{i=1}^4 \Delta P_{Tni} + \Delta P_p + \Delta P_{мп} + \sum_{i=1}^3 P_{Bmi},$$

где ΔP_T – мощность потерь в трансформаторе; ΔP_B – мощность потерь в выпрямителе; P_K – мощность потерь в емкостном накопителе энергии;

$$\sum_{i=1}^3 \Delta P_{Mi} -$$

суммарная мощность потерь в электрических машинах;

$$\sum_{i=1}^4 \Delta P_{Tni} -$$

суммарная мощность потерь в транзисторных преобразователях; ΔP_p – мощность потерь в редукторе; $\Delta P_{мп}$ – мощность потерь в мультипликаторе;

$$\sum_{i=1}^3 \Delta P_{Bmi} -$$

активная мощность обмоток возбуждения электрических машин.

Потери в компонентах приблизительно могут быть определены по их КПД в соответствующих режимах.

3. Моделирование мехатронной системы

Исследование модели системы при обкатке редуктора напора ЭКГ-15М выполнено с помощью Simulink. Моделирование проводилось для системы с двигателями постоянного тока М1 – ДПЭ350Д-2 и М3 – ДПЭ560Д2. Передаточное число редуктора напора 92,59. Коэффициент передачи мультипликатора 31,359.

На рис. 4 и 5 приведены результаты моделирования процесса обкатки редуктора напора ЭКГ-15М (передаточное число 92,59). На рис. 4 показаны осциллограммы процессов при разных угловых скоростях и моментах нагрузки. В интервале времени от 0 до 40 с происходит разгон привода до угловой скорости 20 рад/с при моменте нагрузки на тихоходном валу 1,6 кН·м. В момент времени 40 с угловая скорость увеличивается до 30 рад/с при моменте нагрузки на выходном валу 1,6 кН·м. В момент времени 80 с угловая скорость приводного двигателя увеличивается до 50 рад/с. В момент времени 120 с происходит увеличение момента нагрузки до 9 кН·м, а в момент времени 160 с момент нагрузки возрастает до 16,5 кН·м.

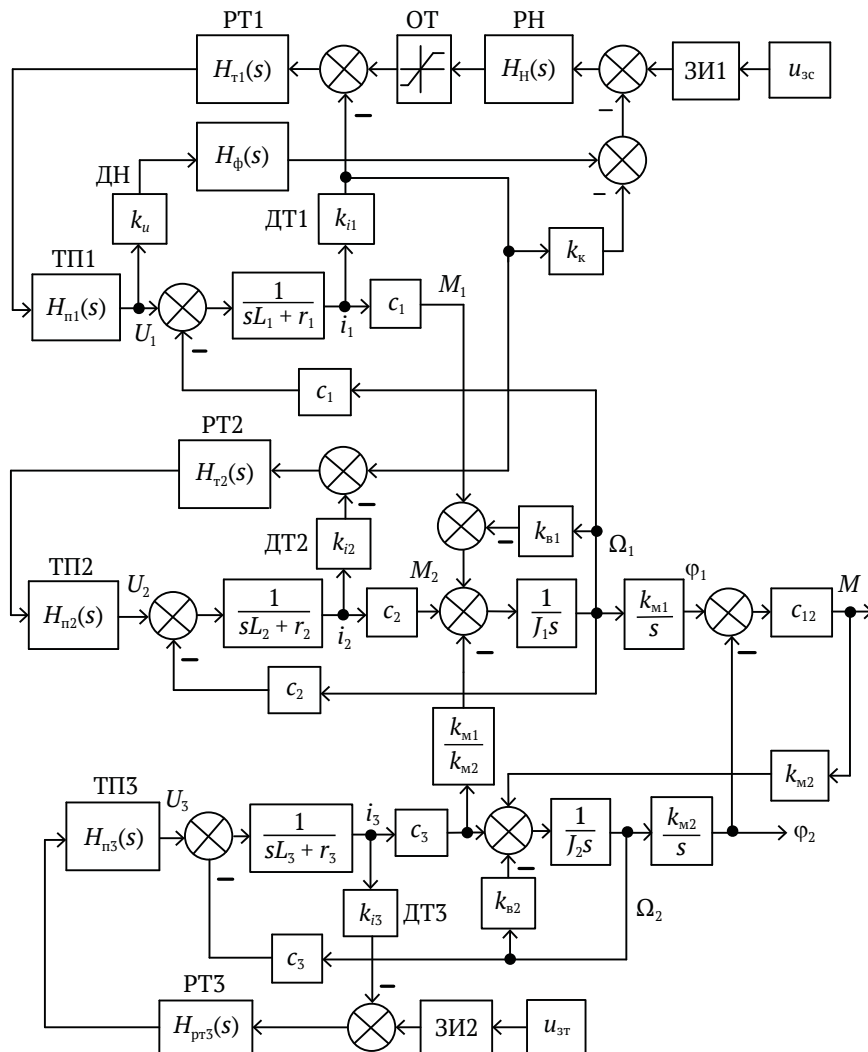


Рис. 2. Структурная схема мехатронной системы обкатки редуктора лебедки подъема

На рис. 5 показаны осциллограммы процессов в мехатронной системе при гармоническом изменении угловой скорости приводного двигателя с периодом 62,8 с. Момент, создаваемый нагружающей машиной, поддерживается постоянным. Ток якорной обмотки нагружающей машины равен 100 А. При этом в первой половине периода изменения угловой скорости момент нагрузки является тормозящим, во второй половине он совпадает по направлению с моментом приводного двигателя.

4. Практическая реализация стенда

Разработанный стенд предназначен для обкатки (приработки сопряженных соединений) и контроля качества изготовления и сборки редукторов лебедок подъема и напора электрических карьерных экскаваторов ЭКГ-8ус, ЭКГ-10, ЭКГ-12К, ЭКГ-15М, ЭКГ-18, ЭКГ-20КМ, ЭКГ-32Р в условиях приемо-сдаточных испытаний. Внешний вид стенда показан на рис. 6.

В стенде применены двигатели экскаваторные постоянного тока мощностью 350 кВт (приводные машины)

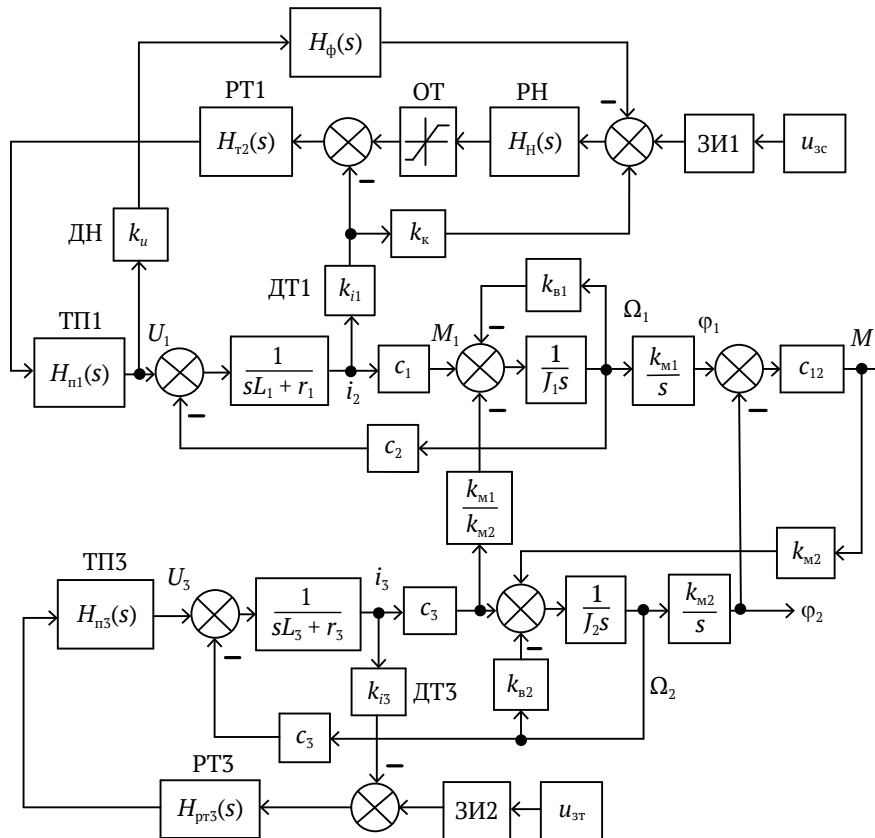


Рис. 3. Структурная схема мехатронной системы обкатки редуктора напора

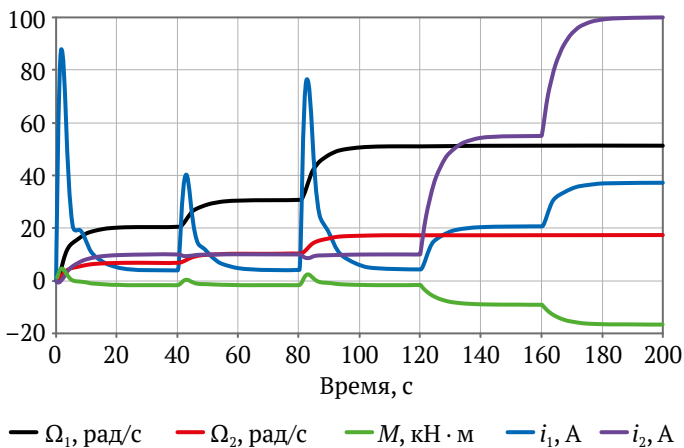


Рис. 4. Осциллограммы процессов при обкатке редуктора напора при различных угловых скоростях и нагрузках

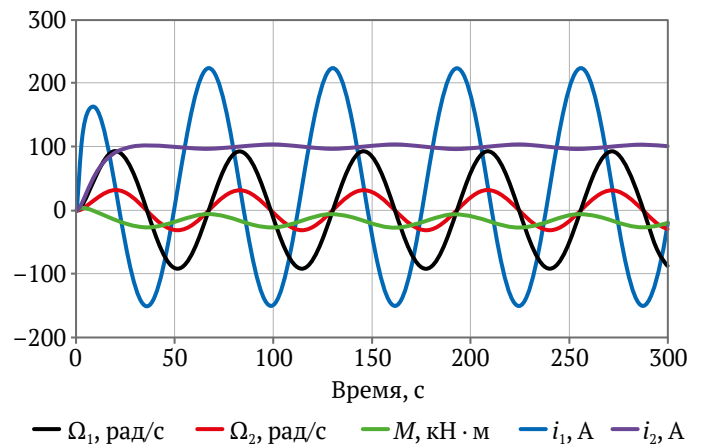


Рис. 5. Осциллограммы процессов при обкатке редуктора напора при гармоническом изменении угловой скорости приводного двигателя и постоянном моменте нагрузки



и мощностью 560 кВт (нагружающая машина). В качестве мультипликатора использован редуктор лебедки подъема экскаватора ЭКГ-15М с передаточным числом 31,359. Два промежуточных вала объединены промежуточной вставкой. Нагружающий двигатель соединен с одним валом. Для управления двигателями используются типовые транзисторные преобразователи постоянного тока с широтно-импульсным регулированием, используемые на экскаваторах с главными приводами постоянного тока [17]. Диапазон регулирования частоты вращения приводных двигателей – 0...1000 об/мин. Диапазон регулирования момента нагрузки на выходном валу нагружающего двигателя – 0...7,5 кН.

Программное обеспечение испытательного стенда реализовано на основе информационно-диагностической системы Пульсар-7 [17]. При этом обеспечиваются следующие режимы работы:

Интерактивное управление компонентами стенда в ручном режиме. В ручном режиме оператор может проверять функционирование компонентов стенда, выполнять их настройку. Программа автоматически распознает отсутствие срабатываний соответствующих автоматических выключателей и готовность силовых преобразователей и приборов контроля.

Автоматическое управление процессом обкатки испытаний. Подпрограммы из имеющейся библиотеки обеспечивают формирование требуемых в соответствии с видом испытания последовательностей управляющих команд. Предусмотрены режимы обкатки без нагрузки, с постоянной нагрузкой, переменными нагрузкой и угловой скоростью, воспроизведения цикла экскавации [18]. Выбор режима осуществляется оператором с помощью компьютера. Текущие значения основных контролируемых параметров (частоты вращения валов двигателей и редуктора, крутящий момент, токи двигателей) отображаются на экране монитора. В процессе испытания производится автоматическое создание протокола по испытываемому изделию. Запись на жесткий диск выполняется в режиме реального времени. Предусмотрена возможность согласованной работы с приборами контроля уровня вибрации, температуры опор валов редукторов, отклонения кинематических параметров зубчатого зацепления и др.



Рис. 6. Испытательный стенд в цехе предприятия

Формирование протоколов испытания. Оператор может просматривать и выводить на печать любые ранее сформированные протоколы. Протокол состоит из текстовой части (требуемые по методике испытания результаты измерений на устанавливаемых режимах изделия) и графической части (выбираемые пользователем параметры для регистрации их зависимости от времени по ходу испытания).

Настройка программы и вспомогательные функции, в том числе справочная подсистема.

Выводы и рекомендации

1. Рассмотренные алгоритмы стабилизации напряжения основаны на аналитическом решении задачи определения режима в электрической системе. Обкатка и испытания механических передач экскаваторов обеспечивают повышение качества и оценку соответствия характеристик изделий требуемым значениям. Обкатка редукторов позволяет выполнить приработку деталей, выявить дефекты сборки и монтажа, провести регулировку сборочных единиц и агрегатов. Режим обкатки разрабатывается индивидуально для каждого типа редуктора. При этом обкатку производят последовательно при различных режимах: от холостого хода до номинальной нагрузки при различных скоростях и направлениях вращения.

2. Разработанный комплекс оборудования обеспечивает реализацию всех тестовых режимов, автоматизацию проведения экспериментов и обработки результатов, а также минимальные энергетические затраты. Стендовое оборудование позволяет проводить на одной установке обкатку и испытания редукторов с различными передаточными числами: от 25,43 (ЭКГ-10) до 82,56 (ЭКГ-32) для редукторов лебедок подъема и от 60 (ЭКГ-10) до 90,6 (ЭКГ-20К) для редукторов напора. Диапазон регулирования частоты вращения приводных двигателей – 0...1000 об/мин. Диапазон регулирования момента нагрузки на выходном валу нагружающего двигателя – 0...7,5 кН. Напряжение питающей сети стенда – 380 В, частота 50 Гц. Питающая сеть трехфазная с заземленной нейтралью. Потребляемая мощность – 400 кВт.

3. Метод взаимной нагрузки электрических машин при обкатке и испытаниях обеспечивает эффективное использование электрической энергии за счет использования рекуперируемой энергии.

4. В стенде применены силовое оборудование и информационная управляющая система Пульсар-7, разработанные для карьерных экскаваторов с приводами главного движения постоянного тока и транзисторными преобразователями энергии. Предусмотрена работа стенда при ручном режиме управления компонентами и автоматическое управление обкаткой и испытаниями.

5. Положительный опыт эксплуатации стенда в ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» свидетельствует о его высоких технических характеристиках. Электротехническое оборудование и программное обеспечение рекомендуются для организации испытаний механических передач тяжелых горных машин различного назначения.

**Список литературы / References**

1. Quan Z., Ge L., Wei Z., Li Y.W., Quan L. A survey of powertrain for energy-efficient heavy-duty machinery technologies. In: *Proceedings of the IEEE*. 2021;109(3):279–308. <https://doi.org/10.1109/jproc.2021.3051555>
2. Хорешок А.А., Кудреватых А.В., Ащеулов А.С. и др. Увеличение ходимости редукторов мотор-колес карьерных самосвалов методом внедрения контроля фактического технического состояния. *Горные науки и технологии*. 2021;6(4):267–276. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-267-276>
Khoreshok A.A., Kudrevatykh A.V., Ashcheulov A.S. et al. Increasing life of pit dump truck motor-wheel gearboxes by introducing the monitoring of the actual technical condition. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):267–276. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-267-276>
3. Drygin M. Yu., Kuryshkin N.P. Increasing the quality of excavators' planetary reduction gearboxes on the basis of dimensional analysis and geometrical characteristics of tooth wheels. In: *Journal of Physics: Conference Series, Volume 944, XI International scientific and technical conference "Applied Mechanics and Dynamics Systems"*. 14–16 November 2017, Omsk, Russian Federation. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012030>
4. Mao Y., Tong J., Chin Z. Y. et al. Transmission error and vibration-based condition monitoring of gear wear with contaminated lubricant. *Wear*. 2023;523:2047–2060. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204760>
5. Gericke B.L., Sushko A.E., Gericke P.B., Efremenkov A.B. Digital technologies used in technical diagnostics, assessment of technical condition, maintenance and repair of mining machines and equipment. In: *Journal of Physics: Conference Series, Volume 2052, 3rd International Scientific and Practical Conference on Mathematical Modeling, Programming and Applied Mathematics (MMPAM 2021)*. 6–7 September 2021, Veliky Novgorod, Russia. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2052/1/012016>
6. Альгин В.Б., Ишин Н.Н. Надежность технически сложных изделий в свете «Индустрии 4.0». *Актуальные вопросы машиноведения*. 2017;(6):43–54.
Algin V.B., Ishin N.N. Reliability of technically complicated items in terms of "Industry 4.0". *Topical Issues of Mechanical Engineering*. 2017;(6):43–54. (In Russ.)
7. Blau P.J. On the nature of running-in. *Tribology International*. 2005;38(11–12):1007–1012. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.020>
8. Jamaria J., Ammarullaha M.I., Afifa I.Y. et al. Running-in Analysis of Transmission Gear. *Tribology in Industry*. 2021;43(3):434–441. <https://doi.org/10.24874/ti.1092.04.21.08>
9. Войнов К.Н. *Обобщения в трибологии*. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений; 2024. 250 с.
Voynov K.N. *Generalizations in tribology*. St. Petersburg: Publishing and Polygraphic Association of Higher Educational Institutions; 2024. 250 p. (In Russ.)
10. Kragelsky I.V., Komalov V.S. Calculation of value of stable roughness after running-in (elastic contact). *Wear*. 1969;14(2):137–140.
11. Sjöberg S., Sosa M., Andersson M., Olofsson U. Analysis of efficiency of spur ground gears and the influence of running-in, *Tribology International*. 2016;93A:172–181. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.045>
12. Wang Q., Ma B., Liang Y. et al. Effects of operating conditions on the tribological behavior of a wet multi-disc clutch during the running-in process. *Tribology International*. 2023;179:108096. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108096>
13. Khonsari M.M., Ghatrehsamani S., Akbarzadeh S. On the running-in nature of metallic tribo-components: A review. *Wear*. 2021;474–475:203871. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203871>
14. Иванов В.П. Обкатка редукторов горно-шахтных машин. *Горная механика и машиностроение*. 2016;(2):55–59.
Ivanov V.P. Running-in of gears of mining machines. *Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*. 2016;(2):55–59.
15. Стрельцов В.В., Попов В.Н., Карпенков В. Ф. *Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигателей*. М.: Колос; 1995. 175 с.
Streltsov V.V., Popov V.N., Karpenkov V.F. *Resource-saving accelerated running-in of repaired engines*. Moscow: Kolos; 1995. 175 p. (In Russ.)
16. Жерве Г.К. *Промышленные испытания электрических машин*. Л.: Энергоатомиздат; 1984. 408 с.
Gervais G.K. *Industrial tests of electric machines*. Leningrad: Energoatomizdat; 1984. 408 p.
17. Малафеев С.И., Серебренников Н.А. Повышение энергетической эффективности карьерных экскаваторов на основе модернизации электрооборудования и систем управления. *Уголь*. 2018;(10):30–34. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-10-30-34>
Malafeev S.I., Serebrennikov N.A. Increasing energy efficiency of mining excavators through upgrade of electrical equipment and control systems. *Ugol'*. 2018;(10):30–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-10-30-34>
18. Malafeev S.I., Novgorodov A.A., Konyashin V.I. Bench tests of the quarry excavators main electric drives. In: *XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. Saint Petersburg, Russia, October 04–07, 2020. <https://doi.org/10.1109/icepds47235.2020.9249257>



Информация об авторах

Сергей Иванович Малафеев – доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники и систем управления, Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация; главный научный сотрудник, ООО «Компания «Объединенная Энергия», г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7691-3442](https://orcid.org/0000-0002-7691-3442); e-mail simalafeev@gmail.com

Алевтина Анатольевна Малафеева – доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Владимирский филиал), г. Владимир, Российская Федерация; ORCID [0009-0000-3141-874X](https://orcid.org/0009-0000-3141-874X), ScopusID [26422368500](https://scopus.com/authorid/26422368500); e-mail amalafeeva@rambler.ru

Владимир Игоревич Коняшин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник инновационного отдела, ООО «Компания «Объединенная Энергия», г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-7183-0780](https://orcid.org/0009-0007-7183-0780), ScopusID [56582464300](https://scopus.com/authorid/56582464300); e-mail solytonik@yandex.ru

Андрей Александрович Новгородов – руководитель отдела проектирования мехатронных систем, ООО «Компания «Объединенная Энергия», г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0000-7557-0145](https://orcid.org/0009-0000-7557-0145), ScopusID [57192383884](https://scopus.com/authorid/57192383884); e-mail novgorodov@jpc.ru

Information about the authors

Sergey I. Malafeev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Computer Engineering and Control Systems, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; Chief Scientific Officer, Joint Power Co., Ltd., Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7691-3442](https://orcid.org/0000-0002-7691-3442); e-mail simalafeev@gmail.com

Alevtina A. Malafeeva – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Information Technology, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Vladimir Branch), Vladimir, Russian Federation; ORCID [0009-0000-3141-874X](https://orcid.org/0009-0000-3141-874X), Scopus ID [26422368500](https://scopus.com/authorid/26422368500); e-mail amalafeeva@rambler.ru

Vladimir I. Konyashin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Innovation Department, Joint Power Co., Ltd., Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0007-7183-0780](https://orcid.org/0009-0007-7183-0780), Scopus ID [56582464300](https://scopus.com/authorid/56582464300); e-mail solytonik@yandex.ru

Andrey A. Novgorodov – Head of the Mechatronic Systems Design Department, Joint Power Co., Ltd., Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0000-7557-0145](https://orcid.org/0009-0000-7557-0145), Scopus ID [57192383884](https://scopus.com/authorid/57192383884); e-mail novgorodov@jpc.ru

Поступила в редакцию 13.05.2024

Поступила после рецензирования 30.08.2024

Принята к публикации 05.09.2024

Received 13.05.2024

Revised 30.08.2024

Accepted 05.09.2024