



ISSN 2518-1653 (online)

vestnik.donntu

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№ 3 (29) 2022 г.



Донецкий национальный технический университет –
кузница инженерных и научных кадров Донбасса



Маятник Фуко



В Донецком национальном техническом университете впервые в Донбассе в 2018 году был запущен маятник Фуко — уникальный лабораторно-исследовательский комплекс, изобретение выдающегося французского физика и астронома XIX века Жана Бернара Леона Фуко, демонстрирующий процесс вращения Земли вокруг своей оси.

Учредитель и издатель: ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

Главный редактор
Маренич К.Н. (д.т.н., проф.)*

Зам. главного редактора
Малеев В.Б. (д.т.н., проф.)*

Редакционный совет:
Артюх В.Г. (д.т.н., проф.)*
Беломеря Н.И. (к.т.н., доц.)*
Бершадский И.А. (д.т.н., проф.)*
Бирюков А.Б. (д.т.н., проф.)*
Горбатко С.В. (к.т.н., доц.)*
Горбатюк С.М. (д.т.н., проф.)*
Дедровец И.Г. (к.т.н., доц.)*
Еронько С.П. (д.т.н., проф.)*
Захаров Н.И. (д.т.н., доц.)*
Ковалев А.П. (д.т.н., проф.)*
Кожевникова И.А. (д.т.н., доц.)*
Кондрахин В.П. (д.т.н., проф.)*
Кононенко А.П. (д.т.н., проф.)*
Куренный Э.Г. (д.т.н., проф.)*
Сотников А.Л. (д.т.н., доц.)*
Ченцов Н.А. (д.т.н., доц.)*
Шабаетов О.Е. (д.т.н., проф.)*
Шаповалов В.В. (д.т.н., проф.)*
Яковченко А.В. (д.т.н., проф.)*

* - штатные сотрудники
учреждения

Адрес: 28301, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефон +380 (62) 301-07-89
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2022. №3 (29)

ISSN 2518-1653 (online)

Издается с января 2016 г.
Периодичность издания: 4 раза в год

Свидетельство
о государственной регистрации
Серия ААА № 000133 от 27.05.2017

За содержание статей и их
оригинальность несут ответствен-
ность авторы. Мнение редакции
может не совпадать с мнением
авторов. За содержание рекламных
материалов ответственность
несет рекламодатель.

Подписано к печати
по решению Ученого Совета
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет»
Протокол №5 от 09.09.2022

Формат 60×84^{1/8}. Заказ 0922.
Изд-во «Донецкая политехника»,
2022

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- В.Ф. Борисенко, В.А. Сидоров, А.И. Землянский**
Подходы к созданию имитационных моделей
сложных систем с электрическим приводом 3
- И.В. Ковалёва**
Экспериментальное обоснование эффективности
двустороннего обесточивания шахтной участковой электросети
на основе применения автономных средств
выявления ее аварийного состояния..... 13
- М.К. Маренич, И.Б. Гуляева**
Ёмкость изоляции электросети участка шахты
как фактор формирования тока в цепи заземления 20
- К.Н. Маренич, А.И. Денисова**
Электробезопасный рудничный асинхронный
двигатель. Обоснование концептуального решения 27

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- А.Я. Бабанин, А.В. Чухаркин, Т.А. Кикош**
Анализ изменения технологических параметров клапанов
газораспределительного механизма двигателя УМЗ-4216
в процессе его эксплуатации в тяжелых условиях
городских пассажирских перевозок..... 36

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Е.В. Ошовская, В.А. Сидоров, Д.О. Прудченко**
Последовательность изучения
упруго-демпфирующих свойств
металлоконструкций мостового крана 43

ИНФОРМАЦИЯ

- Требования к статьям, направляемым в редакцию..... 53

Информация об издании

– На страницах журнала публикуются научные статьи фундаментального и прикладного характера, информация о конференциях, семинарах и выставках; освещается деятельность ведущих научно-исследовательских и проектных институтов, промышленных предприятий и коммерческих организаций, технопарков.
– Журнал оказывает информационную поддержку в продвижении на рынок конкурентоспособной наукоемкой продукции, проектов, научно-технических разработок и высоких технологий в различных областях промышленности.
– Журнал распространяется бесплатно в эл. виде посредством сети Интернет; принимает участие в научных конференциях и выставках.
– Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Интернет: elibrary.ru
– Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК) ДНР. Интернет: vak.mondnr.ru
– Редакция журнала принимает к публикации и осуществляет рецензирование рукописей статей по химическим и техническим наукам и следующим группам специальностей: 05.02 – Машиностроение и машиноведение; 05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09 – Электро-техника; 05.16 – Металлургия и материаловедение; 05.17 – Химическая технология.

Founder and publisher

Donetsk National Technical University (Donetsk)

Editor-in-chief

Marenych K.N. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Deputy Editor-in-chief

Maleev V.B. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Editorial council:

Artyukh V.G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Belomerya N.I. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Bershadsky I.A. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Biryukov A.B. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Gorbatko S.V. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Gorbatyuk S.M. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Dedovets I.G. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Eron'ko S.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Zaharov N.I. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Kovalev A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kozhevnikova I.A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)
Kondrahin V.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kononenko A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kurennyiy E.G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Sotnikov A.L. (Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*
Chentsov N.A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Shabayev O.E. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Shapovalov V.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
Yakovchenko A.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*

* - staff members of the founder

Address: 283001, Donetsk, 58, Artema St.
Phone +380 (62) 301-07-89
E-mail: vestnikdonntu@gmail.com
Internet: vestnik.donntu.org

Vestnik DonNTU
2022. No.3 (29)

ISSN 2518-1653 (online)

Published since January, 2016
Publication frequency: 4 times a year

Certificate of State Registration
Series AAA No. 000133
dated 27.05.2017

The content and originality
of the articles is the author's
responsibility. The editorial opinion
may not necessarily represent
the views of the authors.
The content of advertising material
is the advertiser's responsibility.

Subscribed to print
on the recommendation
of the Academic Council
Donetsk National Technical University
Protocol No.5 dated 09.09.2022

Format 60×84^{1/8}. Order 0922
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2022

CONTENTS

ELECTRICAL ENGINEERING

V.F. Borisenko, V.A. Sidorov, A.I. Zemlyansky

Approaches to creating simulation models
of complex systems with electric drive 3

I.V. Kovalyova

Experimental substantiation of the efficiency of two-end power
supply disconnection of the engine electrotechnical complex
of mine based on the use of autonomous means
of detecting its emergency condition 13

M.K. Marenich, I.B. Guliaeva

The insulation capacity of the electrical network
of the mine site as a factor in the formation of current
in the grounding circuit 20

K.N. Marenich, A.I. Denisova

An electrically safe mine asynchronous motor.
Justification of the conceptual solution 27

ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

A.Y. Babanin, A.V. Chukharkin, T.A. Kikosh

Analysis of changes in the technological parameters of the valves of the gas
distribution mechanism of the UMZ-4216
engine in the process of its operation in difficult conditions
of urban passenger transportation..... 36

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

E.V. Oshovskaya, V.A. Sidorov, D.O. Prudchenko

Sequence of study elastic-damping properties
of overhead crane steel structures 43

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office 53

**Publication
Information**

- The journal publishes research papers of fundamental and applied nature, information on conferences, seminars and exhibitions. It covers the activities of the leading research and design institutes, industrial and commercial companies and technology parks.
- The journal provides information support for the marketing of competitive high-tech products, projects, scientific and technical developments and high technologies in various fields of industry.
- The journal is distributed free of charge in electronic format via the Internet. It provides informational support and participates in International scientific conferences and exhibitions.
- The journal is included into the Russian Index of Science Citation (RISC). Internet: elibrary.ru
- The journal is included in the list of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission (VAK) of the DPR. Internet: vak.mondnr.ru
- The editorial accepts for publication and reviews manuscripts on chemical and technical sciences, and the following groups of specialties: 05.02 – Engineering and engineering science; 05.05 – Transport, mining and construction engineering; 05.09 – Electrical engineering; 05.16 – Metallurgy and materials science; 05.17 – Chemical technology.

В.Ф. Борисенко, В.А. Сидоров, А.И. Землянский
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

В промышленности работает большое число электромеханических систем (ЭМС), приводимых в движение различными приводами постоянного или переменного тока. Моменты сопротивления со стороны механизмов могут иметь различные законы изменения, кинематические схемы существенно отличаются друг от друга. Классификация ЭМС может быть выполнена по типу расчётной механической схемы и характеру нагружения.

Отсутствие достаточного объёма данных о режимах нагружения на этапе проектирования приводит в реальности к отказам под действием паразитных сил. Определение причин отказа требует не только качественной, но и количественной оценки, что достигается имитационным моделированием, в первую очередь динамических сил, возникающих при увеличении зазоров. Прикладной характер данного исследования требует использования единого подхода, позволяющего свести сложные расчётные схемы к нескольким типовым и оценке поведения системы.

Ключевые слова: электромеханическая система, расчётная схема, имитационная модель, паразитные нагрузки.

В процессе проектирования и расчёта механизма конструктор руководствуется нагрузками заданными техническим заданием. Реальный спектр нагрузочных характеристик (значение, частота проявления, длительность приложения силы и др.) всегда отличается от проектного значения. Весьма затруднительно оценить динамические силы, часто являющиеся причиной повреждения и разрушения деталей, что определяется сложностью формы реальных деталей и несовершенством аналитических методик определения напряжений. Стремление повысить уровень надёжности заставляет проектировщиков машин и конструкций увеличивать запасы прочности. Принятые при расчёте допущения снижают или завышают необходимую прочность элементов машин. Увеличение размеров деталей ведёт к возрастанию сил инерции, уменьшение - снижает уровень воспринимаемых напряжений.

Уровень незнания фактических нагрузок на этапе расчёта и конструирования компенсируется коэффициентом незнания – коэффициентом запаса прочности ($K_{зн}$). При этом проявляется следующая зависимость – чрезмерный запас прочности – увеличенная масса, значительные динамические силы; недостаточный – малая сопротивляемость появлению паразитных сил в процессе эксплуатации механического оборудования.

Возможны два пути решения: точное определение механических характеристик используемых материалов [1,2], определение возникающих динамических нагрузок [3...5]. Решению первой

задачи препятствуют: отсутствие критерия подобия между механическими свойствами стального образца и материалом детали, отсутствие аналогичных признаков разрушения при испытаниях и при отказе, разброс свойств материала, отсутствие характеристик, однозначно определяющих прочность материала независимо от величины действующих нагрузок и температуры, масштабный фактор. Для решения второй задачи необходимо точно определить значения всех параметров, входящих в решаемые дифференциальные уравнения.

На первом этапе исследования проводится классификация паразитных сил: а) центробежные; б) динамические; в) силы, возникающие из-за неравномерного приложения нагрузки; г) силы, проявляющиеся при тепловом расширении деталей; д) силы, возникающие из-за перекосов элементов конструкции; е) силы, связанные с увеличением коэффициента трения; ж) силы, проявляющиеся при изменении жёсткости соединительных элементов.

В случае (а) имеет место дисбаланс вращающегося элемента. Возникающая при этом центробежная сила $C = m \cdot \omega^2 \cdot r$, зависит от массы m , радиуса расположения r дисбаланса и угловой скорости ω вращения ротора

Динамические (ударные) нагрузки (б), возникают при появлении зазора, в котором происходит перемещение детали. По второму закону Ньютона появляется сила $F = m \times a$, где m – масса, a – ускорение соударяющихся тел. Эти нагрузки

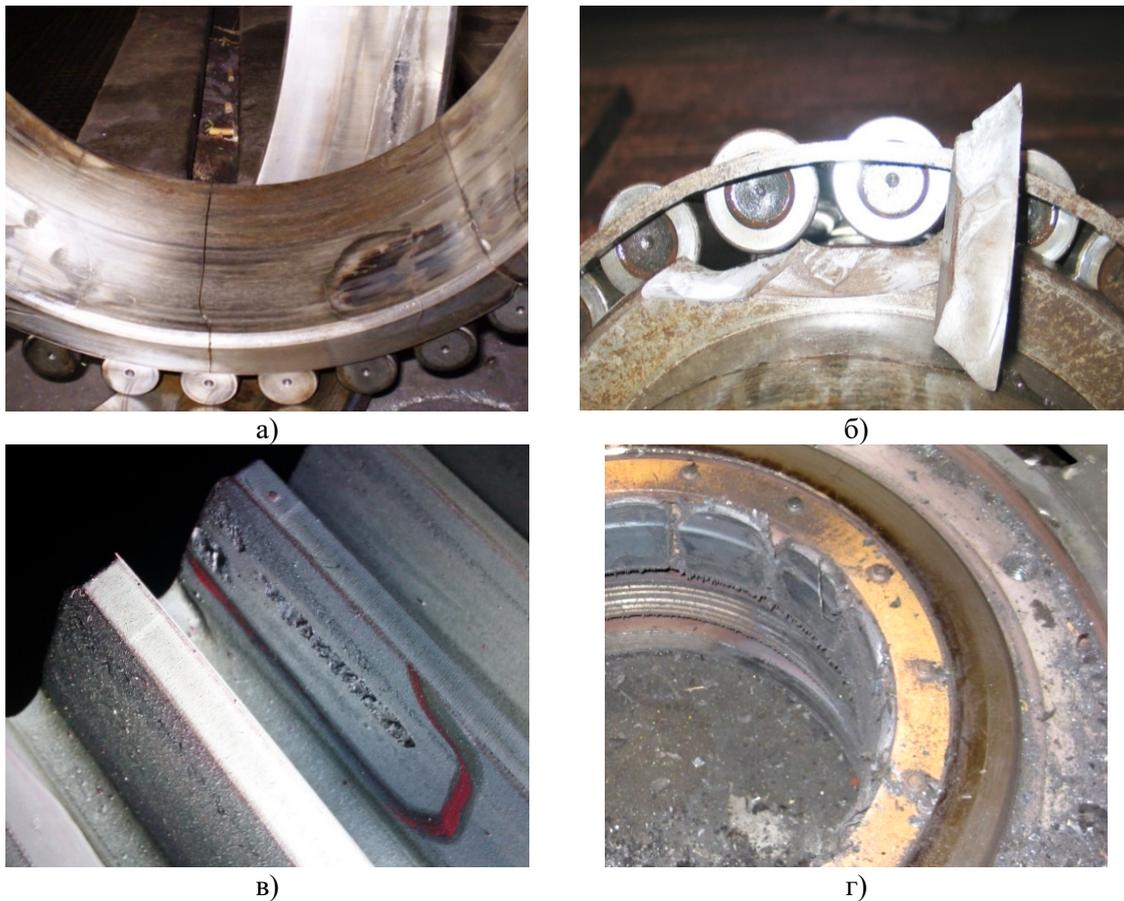


Рис. 1. Проявление паразитных сил:

а) поперечные трещины на кольце подшипника; б) сколы бортов кольца подшипника качения при ударной нагрузке; в) смещение пятна контакта зубчатой передачи; г) ускоренный износ роликов подшипника качения при нарушении режима смазывания

проявляются при быстром выборе зазора, изменении направления вращения и др.

Неравномерное приложение нагрузки (в) возникает из-за неоднородности выработки элементов конкретного узла механизма.

Большое значение могут оказывать усилия, возникающие при тепловом расширении деталей (г) и отсутствии компенсаторов, особенно при контакте разнородных элементов с различными коэффициентами линейного расширения.

Часто причиной выхода из строя узлов и деталей служат перекосы (д), снижающие площадь контакта деталей и увеличивающие контактные напряжения, последние возникают из-за несоосности валов, одностороннего нагрева, износа посадочных мест.

К причинам аварийности следует отнести резкое увеличение коэффициента трения до недопустимых значений при отсутствии смазочного материала в зоне контакта. В случае сухого трения (сталь по стали) $f=0,15$; при схватывании коэффициент трения $-f>1,0$.

В процессе эксплуатации механизма возможно появление трещин в его узлах и деталях, ослабление резьбовых соединений и другие

причины, приводящие к изменению жёсткости сопрягаемых узлов – случай (ж). При динамическом нагружении это провоцирует рост напряжений в деталях механизма и повышение вибрационной активности.

Примеры проявления паразитных сил показаны на рис. 1.

Для электромеханической системы важно рассмотреть следующие элементы:

- двигатель, как преобразователь электрической энергии в механическую;
- соединительные элементы, передающие крутящий момент и компенсирующие отклонения в положении валов – муфты, шпиндели, карданные валы;
- преобразователь характеристик движения – редуктор, шестерённая клеть;
- исполнительный орган – барабан, рабочее колесо, прокатные валки.

Аксиомы работоспособного состояния механической части: низкий уровень вибрации и шума; допустимые значения температуры узлов механизма; сохранение целостности деталей. Это достигается минимизацией динамических, в частности ударных процессов, обеспечением

заданного режима смазывания, отсутствием недопустимых внешних нагрузок и др.

Аксиомы работоспособного состояния электрической части: допустимые значения электрических величин – тока, напряжения, сопротивления, ёмкости, индуктивности; допустимые значения температуры узлов; сохранение целостности и взаимного расположения деталей.

При последующем изложении материала, в качестве примера, использован дымосос установки газоочистки сталеплавильного цеха. Технические характеристики: мощность приводного двигателя 1000 кВт, частота вращения 1475 об/мин. Моделирование неисправностей электро-механической системы требует использования нескольких расчётных моделей:

1. *Кинематической* (рис. 2а) – основание для построения схем надёжности (рис. 2б).

2. *Преобразования электрической энергии в механическую*, основанной на законах электромагнитной индукции и электромагнитных сил:

$$P_{эл} = P_{мех} + \Delta P, \quad (1)$$

где $P_{эл}$ – электрическая мощность, подводимая к двигателю со стороны сети; $P_{мех} = M\omega$ – механическая мощность на валу; ΔP – потери мощности (тепловые, вследствие трения и др.).

3. *Силовой* – определяющей действующие силы на основе аксиом статики, кинематических параметров движения и законов динамики.

4. *Крутильных колебаний* (рис. 2в). Наиболее простым представлением упруго-вязкой механической системы является двухмассовая расчётная схема. В случае учёта сухого трения и зазора поведение системы описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} J_1 \times p \omega_1 &= M_1 - M_{12} - M_{TP1}(\omega_1), \\ J_2 \times p \omega_2 &= M_{12} - M_2 - M_{TP2}(\omega_2), \\ M_y &= C_{12} \times \Delta \varphi_{12}, \\ M_\beta &= \beta_{12} \times \Delta \omega_{12}, \\ M_{12} &= M_y + M_\beta, \\ \Delta \varphi_{12} &= 0 \text{ если } \Delta \omega_{12}/p \leq \delta \varphi_{12}, \\ \Delta \varphi_{12} &= \Delta \omega_{12}/p \text{ если } \Delta \omega_{12}/p > \delta \varphi_{12}, \end{aligned} \quad (2)$$

где p – оператор Лапласа; J_1 – момент инерции первой массы; J_2 – момент инерции второй массы; ω_1 – частота вращения первой массы; ω_2 – частота вращения второй массы; M_1 – движущий момент первой массы; M_{12} – движущий момент второй массы; M_2 – момент сопротивления механизма, приложенный ко второй массе; M_{TP1} – момент сухого трения первой массы, зависящий от частоты вращения первой массы ω_1 ; M_{TP2} – момент сухого трения второй массы, зависящий от частоты вращения второй массы ω_2 ; M_y – упругая составляющая момента, пропорциональная углу

закручивания вала между первой и второй массами; M_β – вязкая составляющая момента, пропорциональная разности частот вращения первой и второй масс; C_{12} – коэффициент упругости между первой и второй массами, $C_{12} = M_{12}/\Delta \varphi_{12}$; β_{12} – коэффициент вязкого трения между первой и второй массами $\beta_{12} = M_{12}/\Delta \omega_{12}$; $\Delta \varphi_{12}$ – текущее значение угла закручивания между первой и второй массами; $\Delta \omega_{12}$ – текущее значение разности частот вращения масс; $\delta \varphi_{12}$ – зазор в кинематической передаче.

5. *Продольных вибрационных колебаний* (рис. 2г) – основной элемент – двухмассовая расчётная схема со стремящейся к бесконечности второй массой. Данный элемент используется для построения многомассовых расчётных моделей [6] уникальных объектов. Факторы модели: масса – m , жёсткость – c , коэффициент демпфирования – h . Колебания системы возможны при воздействии переменной силы – F . Характер вынужденных колебаний определяется силой инерции, упругости, демпфирования и возмущающей силой:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = F. \quad (3)$$

В данной модели учитываются характеристики и реакции системы: масса, жёсткость, коэффициент демпфирования. Значения этих величин при измерениях вибрации неизвестны, но предполагаются неизменными. Повреждения в механической системе приводят к изменению характеристик последней: изменению жёсткости при износе деталей или ослаблении резьбовых соединений; изменению коэффициента демпфирования при развитии трещин и др.

Реакции системы (виброускорение, виброскорость, виброперемещение), являются функцией вынуждающей силы и характеристик системы.

Для получения объективной оценки необходимы значения величин:

- виброускорения a – как показателя сил инерции;
- виброскорости V – как показателя энергии механических колебаний;
- виброперемещения S – как показателя линейных отклонений;
- частоты f – как идентификатора источника механических колебаний.

6. *Термодинамической*, учитывающей процессы нагрева и охлаждения для оценки усталостных явлений. Если представить двигатель однородным телом, тогда:

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-t/T_n}), \quad (4)$$

где $\tau_{уст}$ – установившаяся температура перегрева, T_n – постоянная нагрева.

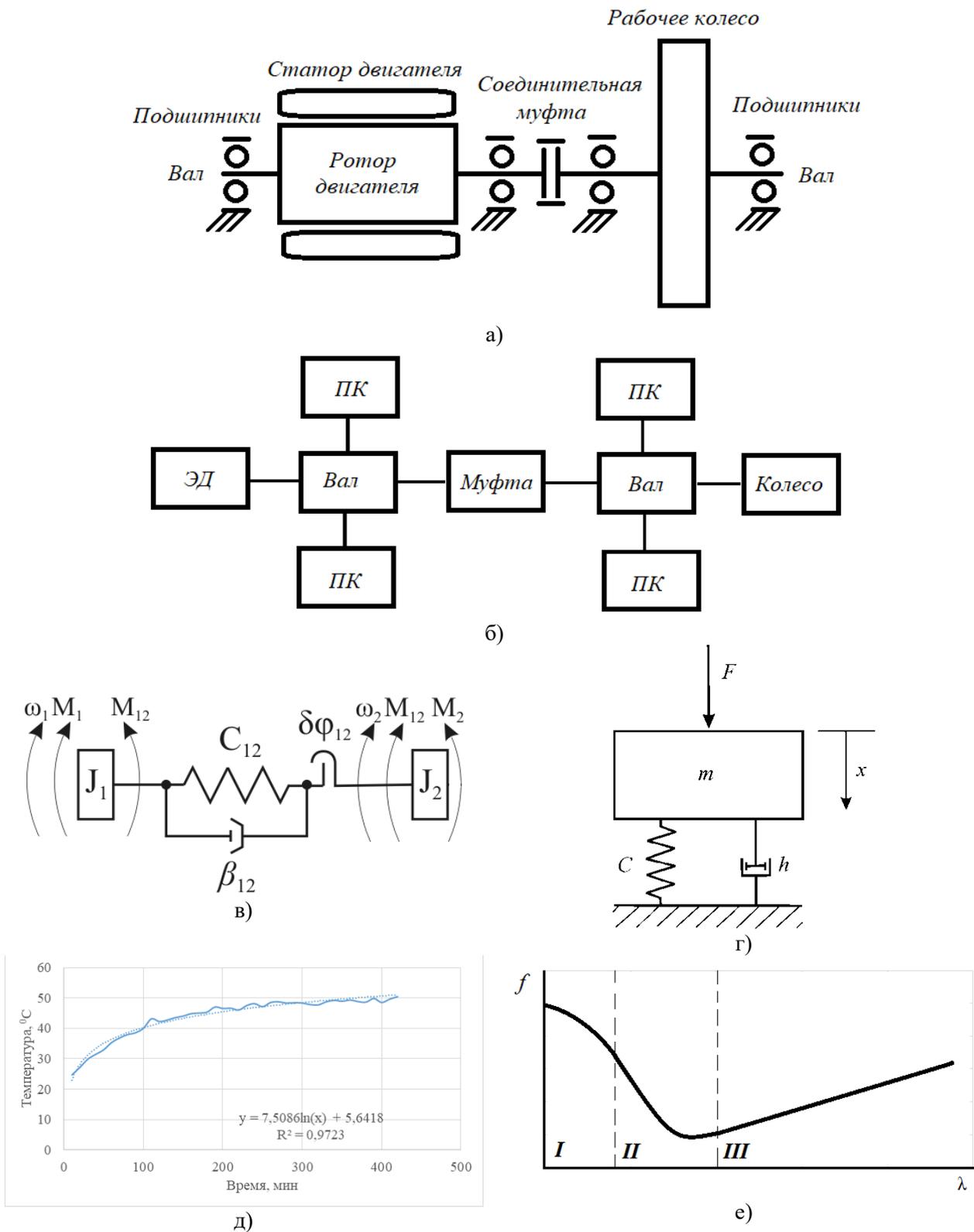


Рис. 2. Модели электромеханической системы:
 а) кинематическая; б) надёжности; в) двухмассовая модель крутильных колебаний;
 г) модель продольных вибрационных колебаний; д) термодинамическая зависимость прогрева исправного механизма до установившейся температуры;
 е) диаграмма Герси-Штрибека

Изменение $\tau_{уст}$ и T_n в процессе эксплуатации указывает на нарушение стабильности величин термодинамического равновесия – появления

дополнительных сил трения, переменных значениях теплопередачи или теплоёмкости. Диагностические параметры (рис. 2д) при тепловом

исследовании: время прогрева механизма до установившейся температуры, скорость нагрева, абсолютное значение и др.

7. *Гидродинамической* – определяющий зависимость коэффициента трения f от характеристики режима работы подшипника λ (рис. 2е):

$$\lambda = \mu \times \omega / p; \quad (5)$$

где μ – динамическая вязкость смазочного материала; ω – угловая скорость вращения вала; p – давление в зоне трения.

Показанные на рис. 2е зоны определяют виды трения: I – граничное трение; II – полужидкостное трение; III – жидкостное трение. Гидродинамическая теория смазки при определении силы трения F учитывает размеры подшипника (радиус r и длину l), вязкость смазочного материала μ , угловую скорость ω и зазор δ :

$$F = 2\pi \times r^2 \times l \times \mu \times \omega / \delta. \quad (6)$$

8. *Модели развития повреждений*: допустимых значений, износую, ступенчатых переходов и логическую, учитывающую взаимное влияние элементов [7].

При проектировании значения составляющих величин данных моделей оцениваются ориентировочно. В процессе эксплуатации, при различных режимах нагружения, изменяются: внешние силы, нагрузки на элементы, характеристики

масляной плёнки; значения упруго-демпфирующих свойств и др. Происходит раскрытие или закрытие зазоров, меняется взаимное расположение деталей, что служит причиной изменения технического состояния. Дополнительно, следует отметить несимметричность характеристик однотипных элементов. Точные значения параметров моделей в условиях эксплуатации определить невозможно, однако, возможно оценить степень их влияния на протекающие процессы и скорость изменения.

Каждому механизму присущи свои особые свойства, но можно выделить ряд общих признаков, таких, как работа с постоянной нагрузкой при выполнении технологической операции ($M_C = \text{const}$), активный или реактивный характер нагружения; зависимость момента сопротивления от частоты вращения ω ($M_C = f(\omega)$), работа по закону постоянства мощности ($M_C = k/\omega$), зависимость момента сопротивления от угла поворота механизма (звена) и его производных ($M_C = f(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi})$); вероятностный характер нагружения ($M_C = f(t)$).

Перечисленные основные законы изменения момента сопротивления присущи определенным группам механизмов (рис. 3).

$M_C = \text{const}$ – *активный* – механизмы подъёма груза – крановые подъёмники; шахтная подъёмная установка с уравновешивающим канатом и противовесом.

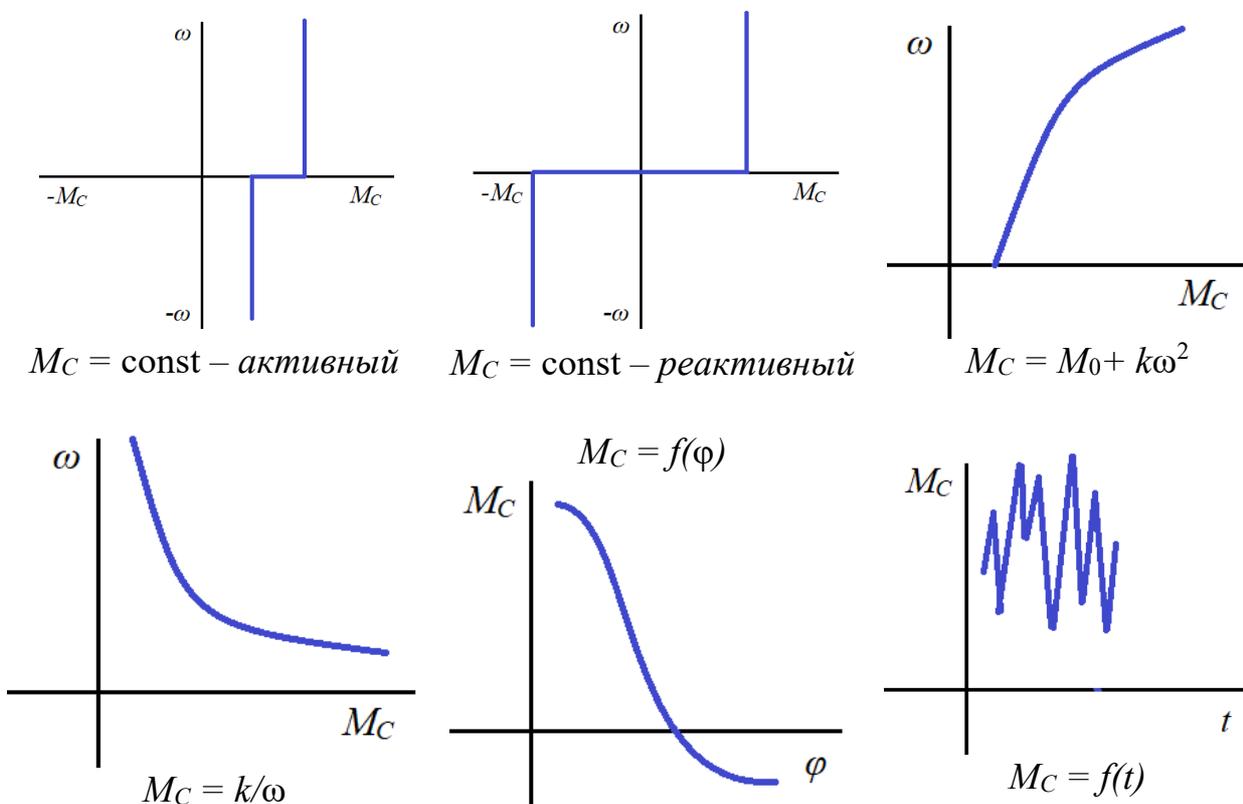


Рис. 3. Основные законы изменения момента сопротивления

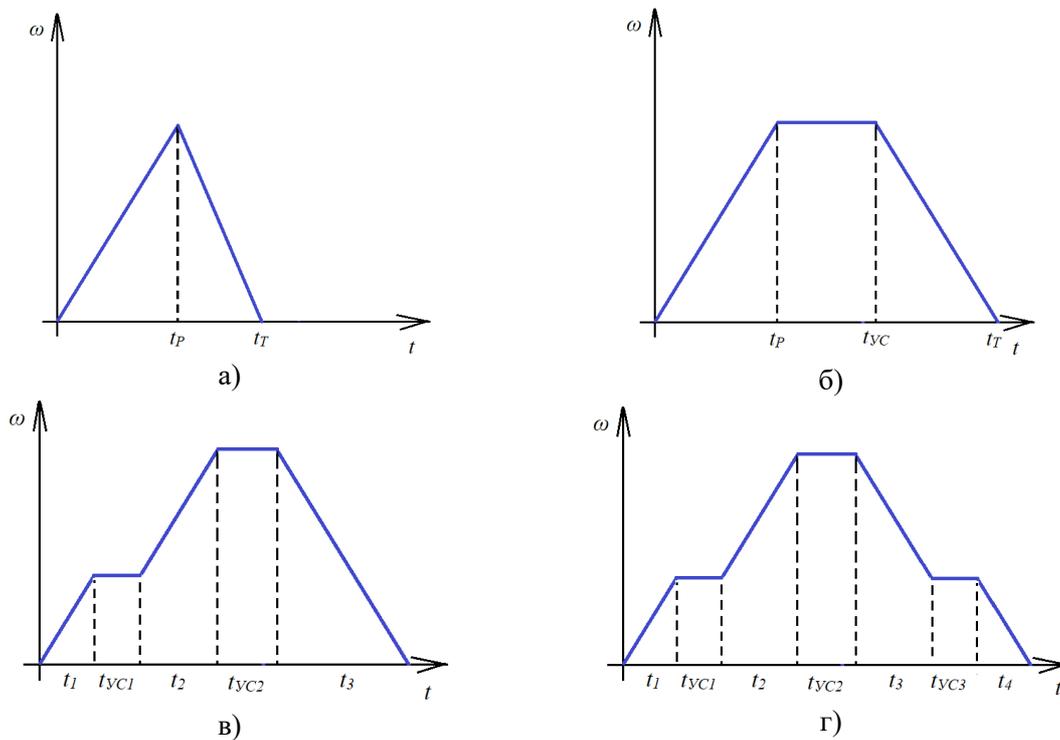


Рис. 4. Тахограммы движения производственных механизмов:
 а) треугольная; б) трапецидальная; в) пятипериодная; г) семипериодная

$M_C = \text{const}$ – реактивный – механизмы передвижения: крана, тележки, слитковоза, рольганга и др.

$M_C = f(\omega)^n - M_C = M_0 + k\omega^2$ – вентиляторы, насосы, дымососы, эксгаустеры с частотой вращения $\omega \leq 1000 \dots 1500 \text{ c}^{-1}$, при $\omega > 3000 \text{ c}^{-1} n > 2$ (2,1; 2,15; 2,2).

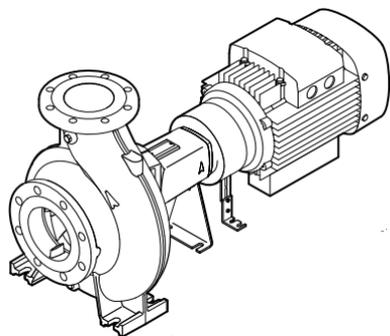
$M_C = M_{CM} \times \sin \omega t$ – поршневые компрессоры и насосы – одинарного, двойного, двухступенчатого действия.

$M_C = f(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi})$ – грохоты, опрокидывающие механизмы, механизм поворота конвертера, ножницы – летучие, кривошипно-шатунные, рычажные и др.

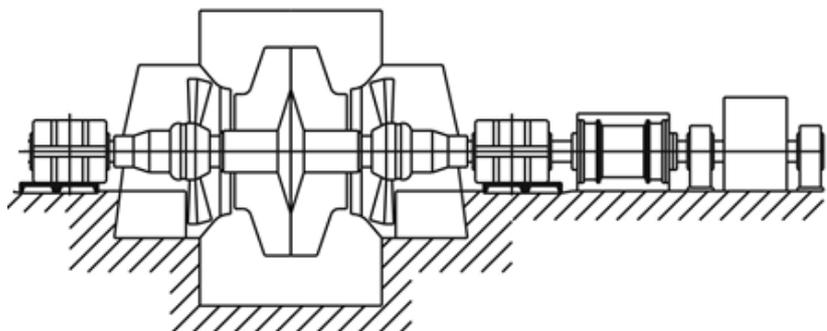
Проанализируем расчётные механические схемы типовых производственных устройств для классификации действующих моментов (сил) и

характера их изменения при обработке типовых диаграмм движения (рис. 4).

Механизмы аэрогидродинамической группы работают в длительном режиме при постоянной частоте вращения. Особые условия предъявляются к пусковым режимам агрегатов, особенно большой мощности. Нагрузочная диаграмма для этих механизмов состоит из двух участков – пускового и рабочего. Торможение осуществляется «самовыбегом», реже применяется динамическое торможение. С появлением мощных, надёжных преобразователей частоты (ПЧ) регулирование производительности механизмов с «вентиляторным» моментом осуществляется по системе ПЧ-АД, ПЧ-СД. Наиболее простой схеме соединения соответствуют блоки «приводной двигатель – насос», «приводной двигатель – вентилятор» (рис. 5).



а)



б)

Рис. 5. Схемы соединения:
 а) двигатель – насос; б) двигатель – вентилятор

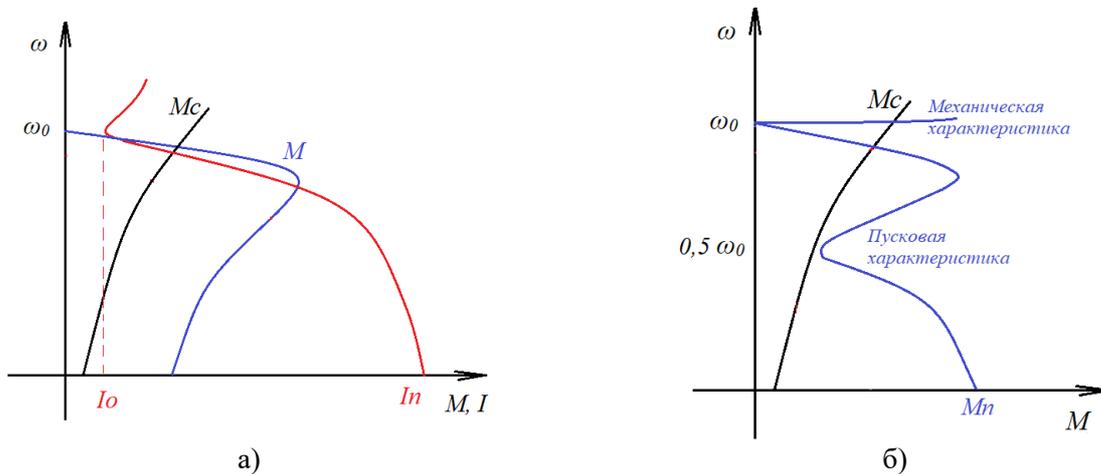


Рис. 6. Пусковые характеристики:
 а) для АД – $I_n=(5...7) I_n$; б) для СД – $I_n=(4...8) I_n$

При этом коэффициент инерции γ составляет 2...20:

$$\gamma = (J_{ДВ} + J_{МЕХ})/J_{ДВ}; \quad (7)$$

где $J_{ДВ}$ и $J_{МЕХ}$ – соответственно, момент инерции двигателя и механизма.

Соединение между двигателем и механизмом жёсткое, поэтому можно рассматривать $J_{\Sigma}=J_{ДВ}+J_{МЕХ}$ как одномассовую систему с присутствием ей уравнением движения:

$$M - M_C = J_{\Sigma} \times (d\omega/dt), \quad (8)$$

$$t_P = J_{\Sigma} \times (\omega_2 - \omega_1) / (M - M_C) = J_{\Sigma} \times \omega_2 / M_{ДИНСР}; \text{ если } \omega_1 = 0.$$

Определенные трудности возникают при рассмотрении пуска «блоков» при больших γ . Время пуска может достигать десятков секунд при больших пусковых токах (рис. 6).

Для снижения пусковых токов применяются реакторы (X_L), которые шунтируются по окончании пуска или реализуется ступенчатый пуск через автотрансформатор. В случае применения систем ПЧ – АД, ПЧ – СД не возникает вопросов с ограничением пусковых токов и регулированием производительности агрегатов.

Системы с мощным приводным синхронным двигателем иногда включают «разгонный» асинхронный двигатель, который проводит систему через половинную рабочую скорость и далее отключается, а синхронный двигатель включается на полное напряжение.

На рис. 9 приведены примеры, демонстрирующие возможности систем контроля временной фиксации токовых показателей. Эти данные могут быть учтены в моделях накопления повреждений для прогнозирования времени отказа или немедленной остановки механизма. Массив данных может быть использован в экспертных программах оценки состояния. Отметим некоторые

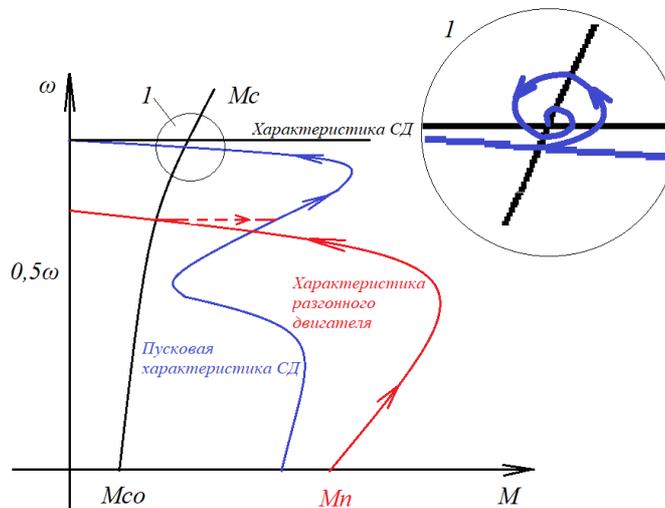


Рис. 7. Пусковая характеристика синхронного двигателя с «разгонным» асинхронным двигателем

особенности, которые возникают при эксплуатации крановых установок в типовых режимах.

В группе крановых механизмов, наибольшие неприятности приносит «раскачивание» груза при пуске и остановке механизма передвижения. Кроме увеличения длительности цикла по перемещению груза, «раскачивание» приводит к росту динамических нагрузок на конструкции фермы. Опытный крановщик поднимает груз на допустимую высоту и тем самым снижает амплитуду его колебаний, повышая в то же время частоту колебаний. Иногда при форсированном

пуске механизма передвижения крана возможна пробуксовка колёс.

В случае регулируемых электроприводов за счет изменения задания по определенному закону удается избежать «пробуксовки» и «раскачивания», что существенно повышает технологичность работы привода.

Для козловых кранов большой грузоподъемности остро стоит вопрос точной остановки, поэтому в системе управления должен находиться блок, отвечающий за контроль пройденного расстояния и дающий сигнал на замедление

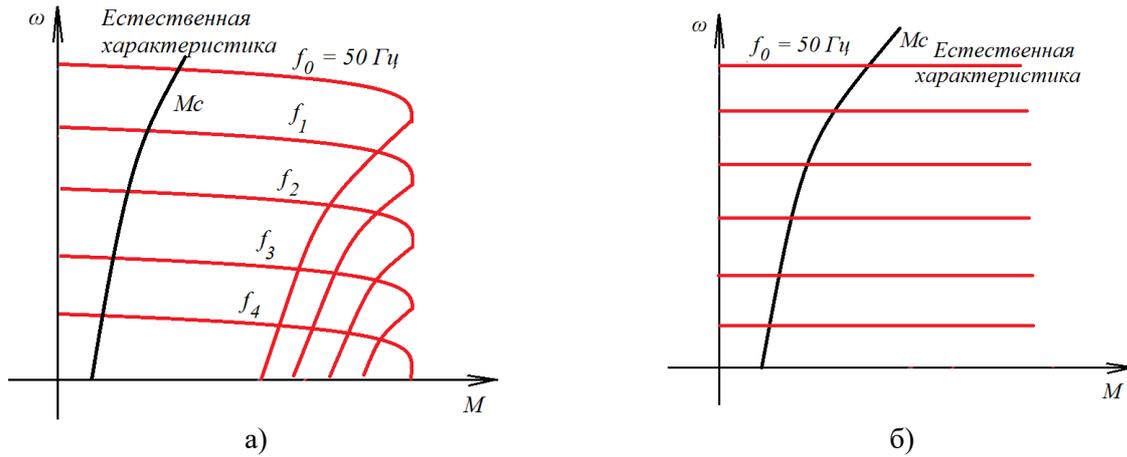


Рис. 8. Регулировочные характеристики: а) в системе ПЧ-АД; б) в системе ПЧ-СД

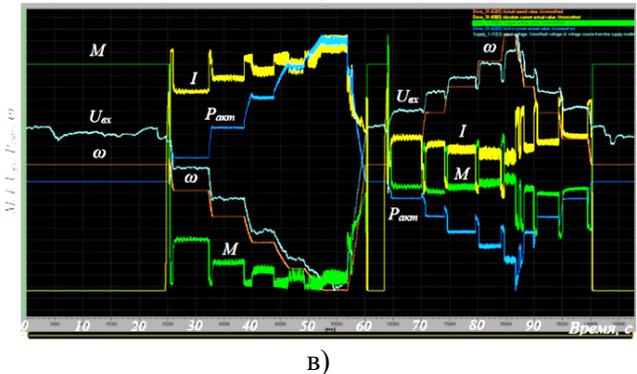
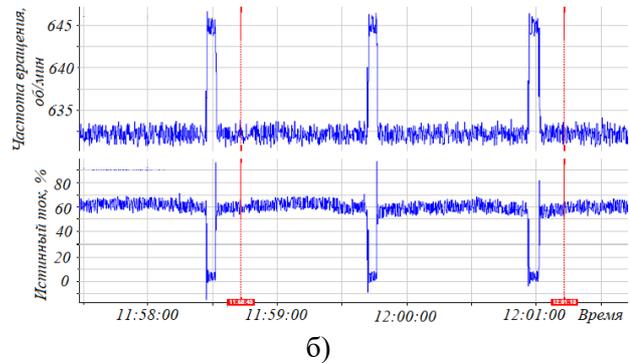
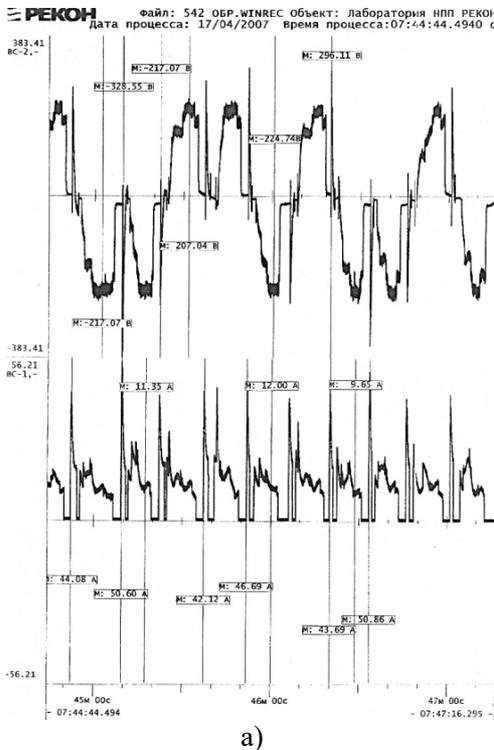


Рис. 9. Временные реализации токовых характеристик: а) двигателей привода передвижения мостового литейного крана; б) частота вращения и ток двигателя при прокатке на непрерывном стане; в) механизма подъема крана: M – момент двигателя; I – ток двигателя; U_{ex} – входное напряжение; $P_{акт}$ – активная мощность; ω – угловая скорость

(остановку) с учётом неточности остановки для данного класса механизма. Диапазон регулирования в таких системах не менее 10.

Козловые краны с большим пролётом (рудно-рейферные краны) подвержены значительным ветровым нагрузкам и у них имеет место эффект «забегания» опор. Чтобы избежать «забегания», необходимо синхронизировать работу приводов опор. Синхронизация возможна за счёт применения специальных схем или путем контроля пройденного расстояния каждой опорой и его выравнивания с достаточной точностью для останова механизма хода.

Основа любого управления – наличие информации, эффективность её обработки и использования.

Для электромеханических систем следует выделить данные характеризующие: элементы механической и электрической систем, а также параметры их взаимодействия. Неисправности систем развиваются по различным моделям, с различной скоростью, что требует наличия информации – оперативной (фиксируемой с максимальным разрешением) и накапливающейся на протяжении длительного времени, а также знания выполненной производственной программы и проведенных ремонтов.

Выводы

1. Состояние эксплуатируемых ЭМС определяется влиянием текущей производственной загрузки, а также возникающими технологическими и паразитными силами, при неопределённости качества текущего технического обслуживания и проведенных ремонтов.

2. Различные законы изменения моментов сопротивления, разнообразие кинематических схем механизмов может быть сведено к ограниченному числу расчётных схем и подходов, приведенных в

данной статье, что составит основу для имитационного моделирования.

3. Оценка фактического состояния ЭМС возможна при наличии необходимого объёма данных о режимах нагружения и действии паразитных сил, что позволит сделать качественную и количественную оценки возможных причин отказа или предотвратить его появление.

Список литературы

1. Артюх В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах. Мариуполь: ПГТУ, 2008. – 246 с.
2. Беленький Д.М., Ханукаев М.Г. Теория надежности машин и металлоконструкций. – Ростов н/Д: «Феникс», 2004. – 608 с. (Серия: «Учебники для технических вузов»).
3. Артюх В.С. Динамичность приводов – аварийность оборудования. Мариуполь. – 2002 г. – 10 с.
4. Савельев А.Н., Козлов С.В., Винокуров Н.Е. Динамические нагрузки, воздействующие на элементы многодвигательного гидропривода холодильника МНЛЗ. Известия высших учебных заведений. – Черная металлургия. – 2018. – Том 61. – № 2. – С. 149-155.
5. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Аниканов Д.С., Реморов В.Е. Об использовании метода контроля состояния машин технологических агрегатов по энергетическим параметрам привода // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2013. – №12. – С. 31-33.
6. Логов, А.Б. Математические модели диагностики уникальных объектов / А.Б. Логов, Р.Ю. Замараев – Новосибирск: изд-во СО РАН, 1999. – 228 с.
7. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. Под ред. Б.В. Гнеденко, М.: «Советское радио», 1966. – 166 с.

V.F. Borisenko, V.A. Sidorov, A.I. Zemlyansky
Donetsk National Technical University (Donetsk)

APPROACHES TO CREATING SIMULATION MODELS OF COMPLEX SYSTEMS WITH ELECTRIC DRIVE

Annotation. There are a large number of electromechanical systems (EMC) operating in the industry, driven by various DC or AC drives. The moments of resistance on the part of the mechanisms may have different laws of change, kinematic schemes differ significantly from each other. The EMC classification can be performed according to the type of the calculated mechanical circuit and the nature of loading. The lack of sufficient data on loading modes at the design stage leads in reality to failures under the influence of parasitic forces. Determining the causes of failure requires not only qualitative, but also quantitative assessment, which is achieved by simulation modeling, primarily the dynamic forces that arise when gaps increase. The applied nature of this study requires the use of a unified approach that allows to reduce complex computational schemes to several standard ones and to evaluate the behavior of the system.

Keywords: *electromechanical system, design scheme, simulation.*

Сведения об авторах

В.Ф. Борисенко

SPIN-код: 5895-9776
Телефон: +7 (949) 354-89-96
Эл. почта: borissenko.vp@gmail.com

А.И. Землянский

SPIN-код: 8480-3674
Телефон: +7 (949) 334-91-87
Эл. почта: andrewiz@yandex.ru

В.А. Сидоров

SPIN-код: 2618-4815
Телефон: +7 (949) 312-79-13
Эл. почта: sidorov_va58@mail.ru

*Статья поступила 12.09. 2022 г.
© В.Ф. Борисенко, В.А. Сидоров, А.И. Землянский, 2022
Рецензент д.т.н., проф. В.Н. Павлыш*

УДК 622.012.2:621.316

И.В. Ковалёва /к.т.н./

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУСТОРОННЕГО ОБЕСТОЧИВАНИЯ ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНЫХ СРЕДСТВ ВЫЯВЛЕНИЯ ЕЕ АВАРИЙНОГО СОСТОЯНИЯ

Разработан экспериментальный стенд и экспериментальный образец автономного устройства автоматического подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя при повреждении его питающего кабеля. Проанализированы результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: *экспериментальный стенд, двустороннее обесточивание, адекватность математической модели, математическое ожидание, автономные технические средства.*

Постановка проблемы

Нестационарность технологического оборудования в процессе эксплуатации шахтного участка определяет необходимость применения разветвленной сети гибких кабелей (ГК). При этом в условия горного производства существует повышенная опасность механического повреждения кабелей, что, в свою очередь, является причиной возникновения таких опасных аварийных состояний участковой электросети, как однофазная утечка тока на землю и междуфазные короткие замыкания (к.з.). Существующие средства максимальной токовой защиты отключают место замыкания от источника электропитания со стороны участковой трансформаторной подстанции (ТП) и характеризуются достаточным быстродействием. Опережающую защитную функцию выполняет также участковый аппарат защиты от утечек тока на землю в случае, если повреждение экранированного шахтного кабеля начинается с повреждения изоляции одной из силовых жил. Однако после защитного отключения сети электротехнического комплекса (ЭТК) от источника электропитания опасное аварийное состояние некоторое время может поддерживаться обратными энергетическими потоками асинхронных двигателей (АД), которые были включены в аварийном присоединении. Эта проблематика требует отдельного исследования с целью создания автономных технических средств защитного отключения обратных энергетических потоков асинхронных двигателей при возникновении аварийного состояния электротехнического комплекса. Их применение позволит избежать поддержания тока в цепи короткого замыкания после защитного отключения электросети, а также значительно упростить структуру средств защиты от

утечек тока на землю путем отказа от функции определения и последующего шунтирования на землю поврежденной фазы.

Анализ исследований и публикаций

Исследования процессов в шахтных участковых электротехнических комплексах при возникновении опасных состояний касаются обоснования технических решений обесточивания места повреждения кабеля путем отключения энергетического потока, направленного от трансформаторной подстанции [1...3]. Кроме того, в результате проведенных теоретических исследований была разработана математическая модель электротехнического комплекса технологического участка шахты, описывающая процессы в его структурных составляющих в момент возникновения и дальнейшего протекания аварийных состояний междуфазной проводимости и утечки тока на землю с учетом влияния обратных энергетических потоков ранее включенных асинхронных двигателей потребителей и параметров цепи устройства их отключения [4,5]. Однако для проверки адекватности разработанной математической модели реальным процессам в ЭТК технологического участка горного предприятия возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований.

Цель исследования

Целью экспериментальных исследований является экспериментальная проверка и подтверждение адекватности результатов, полученных при проведении теоретических исследований, а также анализ возможностей автономного устройства защиты относительно обеспечения приемлемых технических показателей подавления

обратного энергетического потока АД при возникновении аварийного состояния в его питающем кабеле.

Результаты исследования

На основе результатов и рекомендаций, полученных при проведении теоретических исследований, обоснована структура и изготовлен исследовательский экспериментальный стенд и экспериментальный образец автономного устройства автоматического подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя при повреждении его питающего кабеля, расположенный в лаборатории рудничного электрооборудования кафедры «Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова» ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Это устройство имеет рудничное исполнение и адаптировано к применению в условиях шахты.

На рис. 1 приведена принципиальная схема исследовательского стенда, рассчитанного на номинальное линейное напряжение сети $U_{л1}=380$ В, имитирующего функционирование участкового электротехнического комплекса напряжением $U_{л2}=660$ В (режим нейтрали – изолированный).

Силовая часть экспериментального стенда состоит из: коммутационных аппаратов SF1 (АЕ-2056-10 0-00У3.УХЛ4-А) и SF2 (Moeller AK51F PL4-C63/3); резисторов $R_A - R_C$ (МЛТ-1-1М±5%) и конденсаторов $C_A - C_C$ (МБГЧ-1 0,25мкФ±10%), которые подключены между фазами сети и общей шиной «искусственная земля», имитируя параметры изоляции гибкого кабеля участкового ЭТК; коммутационного аппарата KM1 (ПМА-3102 У4), который включает асинхронный двигатель типа ВАО-51-4У2 мощностью 7,5 кВт; аппарата защиты от утечек тока на землю типа АЗУР.1, выходные цепи управления которого подключены к независимому расцепителю PH (Moeller AK68B ZP-ASA/230) коммутационного аппарата (автоматического выключателя) SF2; экспериментального образца устройства подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя. Между фазой А и шиной «искусственная земля» подключена цепь замыкания фазы на землю, которая состоит из тумблера ТУ и магазина сопротивлений М.С. (Р33 класс 0,2).

Схема экспериментального образца автономного устройства автоматического подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя (рис. 2а) состоит из коммутационного

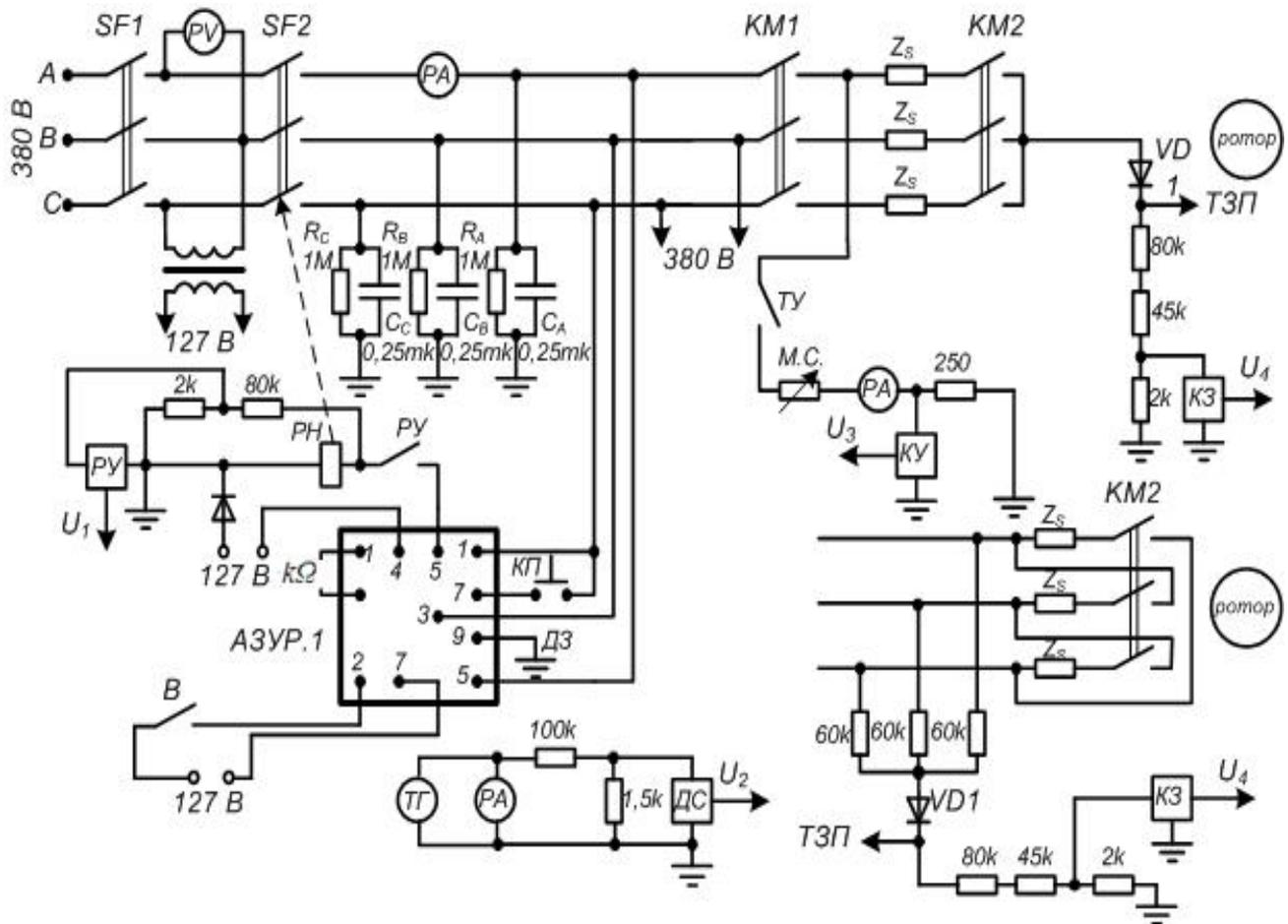


Рис. 1. Принципиальная схема исследовательского стенда

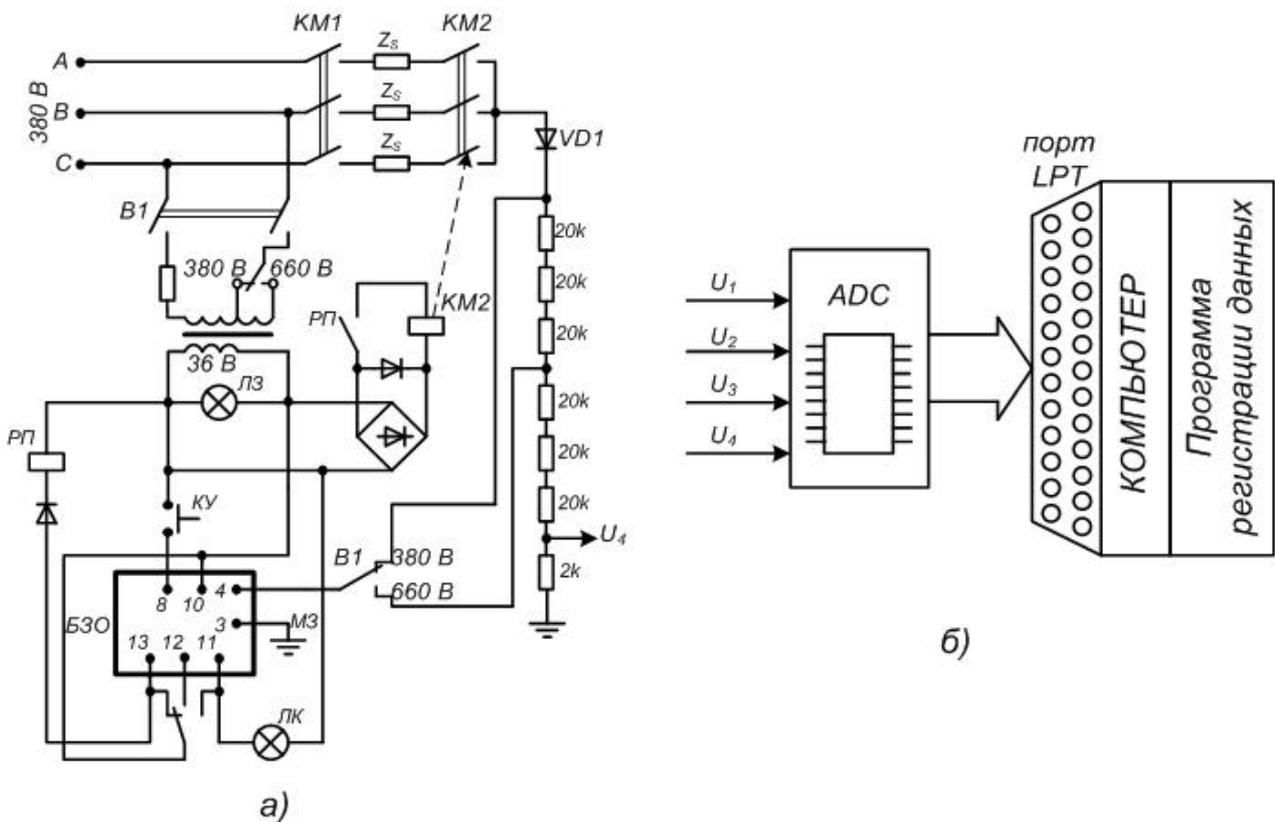


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального образца автономного устройства автоматического подавления обратного энергетического потока АД (а) и функциональная схема системы регистрации данных (б)

аппарата *KM2* (КРМ), коммутирующего схему его статора, общая точка которого подключена к шине «искусственная земля» через полупроводниково-резистивную цепь *VD1-R*. Сигнал по напряжению от этой цепи поступает в блок определения информационного параметра полупроводниково-резистивную цепи (блока защитного отключения БЗО). Схема последнего выполнена на основе адаптации схемы серийного блока токовой защиты от перегрузки ТЗП [6] путем исключения из его состава каналов моделирования экспонента нагрева двигателя потребляемым током. Выходные цепи БЗО подключены к схеме управления коммутационного аппарата *KM2*. Переключатель *B1* предназначен для выбора уровня напряжения сети (380/660 В).

Система регистрации данных в комплексе с персональным компьютером (рис. 2б) позволяет фиксировать осциллограммы с измерительных датчиков напряжения в памяти персонального компьютера.

Для измерения электрических параметров в контрольных точках (сигнал о срабатывании АЗУР.1 U_1 , сигнал от датчика скорости ДС U_2 , ток в аварийной цепи U_3 , ток в измерительной цепи аппарата защиты U_4) в составе исследовательского стенда предусмотрены делители напряжения, предназначенные для снижения амплитуды

сигнала до величины, согласованной с параметрами аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Микроконтроллер блока АЦП по очереди опрашивает каждый из датчиков и передает снятые сигналы на параллельный порт персонального компьютера, где они регистрируются.

Кроме того, в составе стенда предусмотрен вольтметр Э378, миллиамперметр М906 и микроамперметр Э513, предназначенные для визуального контроля за состоянием процессов в системе, а также тахогенератор постоянного тока типа ЭТ-7/110 для измерения частоты вращения приводного асинхронного двигателя.

С использованием стенда описанной конфигурации проведены экспериментальные исследования параметров сети электропитания асинхронного двигателя, сопровождающие процессы возникновения недопустимо низкого электрического сопротивления между фазой сети и землей, определенного нормативными документами как сопротивление тела человека ($R_3=1$ кОм), или сопротивление срабатывания аппарата защиты от утечки тока на землю ($R_{cp}=10$ кОм/фазу при напряжении 380 В; $R_{cp}=30$ кОм/фазу при напряжении 660 В) [6]. Перечень проведенных экспериментов представлен в табл. 1.

Программа проведения экспериментов предусматривала выполнение следующей

последовательности операций: пуск двигателя; подключение цепи возникновения недопустимо низкого электрического сопротивления между фазой сети и «искусственной землей»; автоматическое отключение или принудительное удержание во включенном состоянии коммутационных аппаратов; отключение асинхронного двигателя; после окончания эксперимента – возврат системы в первоначальное состояние. Указанная последовательность действий сопровождалась компьютерной регистрацией сигналов с датчиков.

В ходе исследований анализировались переходные процессы при возникновении цепи повышенной проводимости между фазой сети и землей. После пуска двигателя, путем включения автоматического выключателя *SF2* и коммутационного аппарата *KM1*, в момент времени t_1 образуется цепь повышенной проводимости на землю фазы А присоединения (замыканием тумблера *TU*).

Условия эксперимента №1 предусматривают принудительное сохранение включенного состояния всех коммутационных аппаратов (*KM1*, *KM2*, *SF2*) при возникновении утечки тока на землю ($R_y=1$ кОм). Включенное состояние автоматического выключателя *SF2* обеспечивается отключением тумблера *B* (рис. 1), включенное состояние контактора *KM2* обеспечивается разрывом измерительной цепи *BЗО*.

Условия эксперимента №2 предусматривают принудительное сохранение включенного состояния коммутационного аппарата *KM2*, что обеспечивается разрывом измерительной цепи *BЗО*, при возникновении утечки тока на землю ($R_y=1$ кОм). По сигналу от аппарата защиты от утечек тока на землю отключается автоматический выключатель *SF2*. Время срабатывания АЗУР.1 обозначено как момент времени t_2 .

Условия эксперимента №3 предусматривают автоматическое отключение всех коммутационных аппаратов (*KM1*, *KM2*, *SF2*) при возникновении утечки тока на землю ($R_y=1$ кОм). В момент времени t_2' по сигналу от блока защитного отключения *BЗО* коммутационный аппарат *KM2*

разрывает статорную обмотку асинхронного двигателя, что обеспечивает подавление его энергетического потока. В момент времени t_2 по сигналу от аппарата защиты от утечек тока на землю отключается автоматический выключатель *SF2*.

В ходе проведения экспериментов №1-3 по снятым с делителей напряжения *K3*, *KV* (рис. 1) данным, получены осциллограммы тока в цепи утечки на землю (рис. 3). Путем анализа этих осциллограмм при проведении экспериментов №2-3 вычислены кривые $q(t)$ накопления количества электричества через сопротивление R_y цепи утечки (рис. 3 б, в). По этим кривым определено общее количество электричества (Q) через сопротивление R_y в каждом из экспериментов. Выборочное математическое ожидание общего количества электричества через сопротивление R_y в условиях экспериментов №2-3 составляет, соответственно, $m(Q)=34,02$ мА·с и $m(Q)=25,4$ мА·с при стандартном отклонении $s(Q)=1,01$ мА·с и $s(Q)=0,73$ мА·с.

Для проверки адекватности обоснованной ранее математической модели электротехнического комплекса результатам экспериментальных исследований, рассчитаны параметры распределения величины Q , полученные путем компьютерного моделирования для условий исследований №2-3. Полученные при математическом моделировании средние значения количества электричества Q соответствуют экспериментальным значениям в пределах ошибки 4%, что допустимо для технических расчетов.

В ходе эксперимента №4 выполнен анализ чувствительности срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю и устройства автоматического подавления обратного энергетического потока АД при возникновении утечки тока на землю при изменении электрического сопротивления между фазой сети и землей.

Изменение сопротивления выполнялось с помощью магазина сопротивлений *M.C.* в пределах, соответствующих нормативным (при линейном напряжении питания 380 В – $R_y=10$ кОм). В каждом эксперименте определялось сопротивление

Табл. 1. Перечень экспериментов, проведенных на исследовательском стенде (знаком «×» обозначено включенное состояние коммутационного аппарата)

№	Состояние коммутационных аппаратов			Режим функционирования исследовательского стенда
	<i>KM1</i>	<i>SF2</i>	<i>KM2</i>	
1	×	×	×	Возникновение аварийного состояния (1кОм)
2	-	-	×	Возникновение аварийного состояния (1кОм)
3	-	-	-	Возникновение аварийного состояния (1кОм)
4	-	-	-	Возникновение аварийного состояния (10кОм)

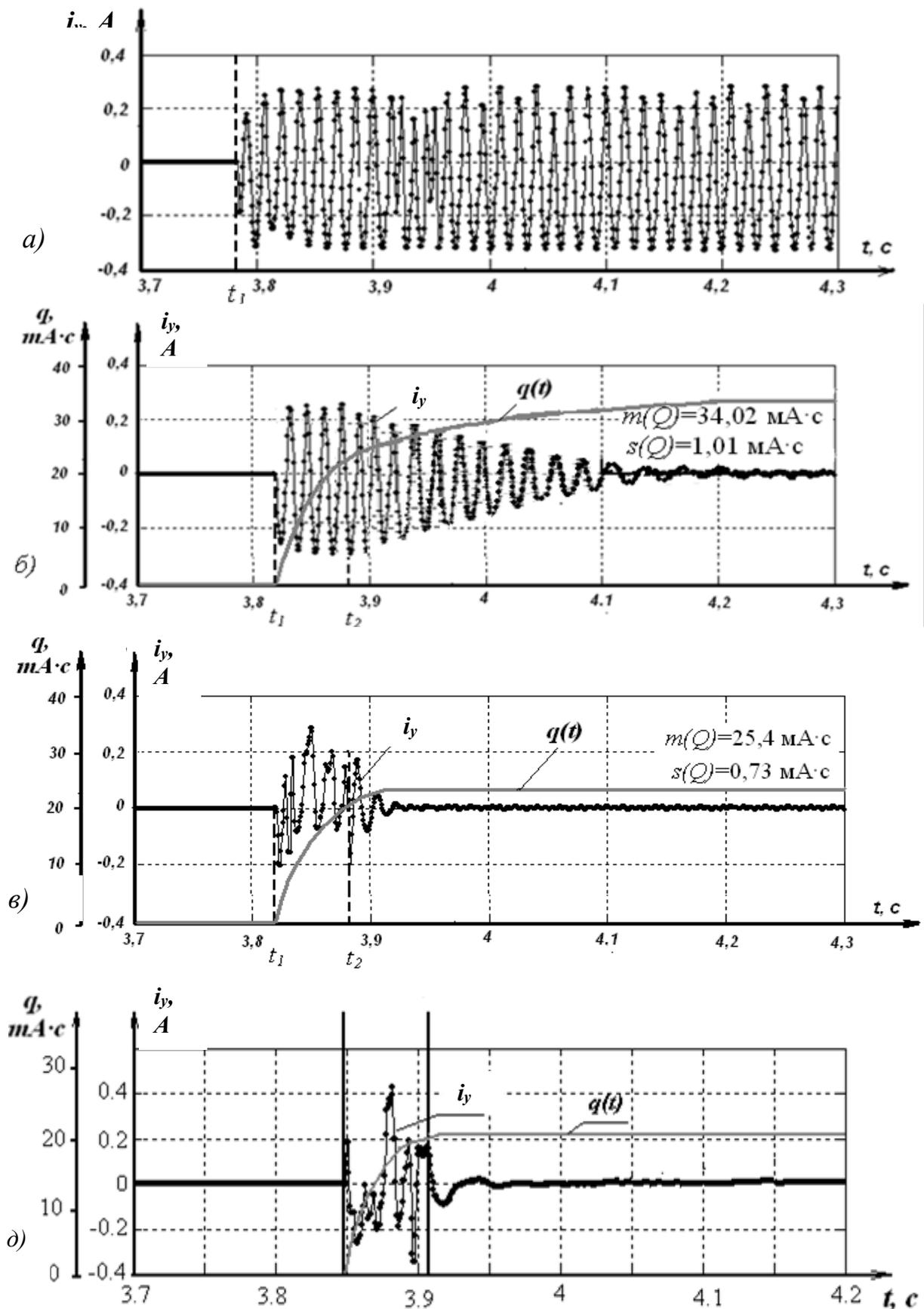


Рис. 3. Осциллограммы мгновенных значений тока утечки на землю и кривая накопления количества электричества во времени через сопротивление R_y цепи утечки:

а) эксперимент №1; б) эксперимент №2; в) эксперимент №3;

д) эксперимент №3 с подключением искусственной «звезды» резисторов

R_y цепи утечки, при котором осуществлялось защитное двустороннее обесточивание аварийной точки. Выборочные значения сопротивления R_y цепи утечки тока на землю имеют следующие статистические характеристики: $m(R_y)=9,7$ кОм; $s(R_y)=0,98$ кОм.

Выводы

Разработан экспериментальный стенд и экспериментальный образец автономного устройства автоматического подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя при повреждении его питающего кабеля, что позволило моделировать работу ЭТК шахтного участка и проводить измерения необходимых величин.

Экспериментальные исследования подтвердили достоверность полученных результатов теоретических исследований с допустимыми значениями относительных ошибок расчетов: отклонение рассчитанных на математической модели выборочных математических ожиданий общего количества электричества Q через сопротивление цепи утечки тока на землю от эмпирических величин не превышает 4%; определенная экспериментальными исследованиями чувствительность срабатывания устройства автоматического подавления обратного энергетического потока АД при возникновении утечки тока на землю соответствует нормативным документам [7]; подтверждено отсутствие влияния автономного средства подавления обратного потока асинхронного двигателя на параметры функционирования участкового аппарата защиты от утечек тока на землю; подтверждена способность автономного средства подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя в комплексе с участковым аппаратом защиты от утечек тока на землю (при условии применения экранированных гибких кабелей в электротехническом комплексе участка шахты) обеспечить функцию двустороннего обесточивания места повреждения сети электротехнического комплекса.

I.V. Kovalyova /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

Направлением дальнейших исследований является обоснование параметров технических средств защитного подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя, адаптированных к условиям эксплуатации существующих и перспективных шахтных участков электрических сетей.

Список литературы

1. Римап, Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт / Я.С. Римап. – Москва: Недра, 1977. – 206 с.
2. Nelson, J.P. System Grounding, Ground Fault Protection and Electrical Safety. IEEE Press Series on Power Engineering / J.P. Nelson, P.K. Sen. – Wiley-IEEE Press, 2009. – 500 p.
3. Переходные процессы в системах электрооборудования: учеб. для вузов / Г.Г. Пивняк [и др.]; под ред. Г.Г. Пивняка. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат; Днепрпетровск: НГУ, 2003. – 548с.
4. Маренич, К.Н. Научные основы применения автоматического защитного двустороннего обесточивания электросети участка шахты: монография / К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2017. – 125 с.
5. Маренич, К.Н. Автоматическая защита электрооборудования шахт от аварийных и опасных состояний: учебное пособие / К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 216 с.
6. Справочник энергетика угольной шахты / [Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М.]; под общ. ред. Ванеева Б.Н. – [2-е изд.] – Донецк, ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001 – Т1, – 447 с.
7. Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические требования: ГОСТ 31612-2012. – [Дата введения 15.02.2013]. – Москва: Стандартиформ, 2013. – 16 с. – (Межгосударственный стандарт).

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE EFFICIENCY OF TWO-END POWER SUPPLY DISCONNECTION OF THE ENGINE ELECTROTECNICAL COMPLEX OF MINE BASED ON THE USE OF AUTONOMOUS MEANS OF DETECTING ITS EMERGENCY CONDITION

Background. Operating conditions of engine electromechanical equipment of mine is determined by its location nonstationarity, which, in turn, makes it necessary to use of flexible cables. Mechanical damage to the supply cable is the cause of phase-to-phase short circuits and earth leakages. Overcurrent protection and leakage protection disconnect emergency point from power supply. However back-to-

network power generation produced by induction motors after the protective disconnection of power supply de-energizing has occurred.

Materials and/or methods. *The mathematical model of an engine electrotechnical complex of mine describing its structural elements and covering behavior of variables and other important factors, as follows: variable referring to emergency conditions caused by phase-to-phase short circuits and earth leakages; factors causing back-to-network power generation produced by induction motors, including its conditions prior to and after the protective disconnection of power supply de-energizing has occurred; as well as variables of the protection circuits intended for breaking possible distribution circuits for the induction-motor generated power. However, it is necessary to conduct experimental studies to verify the compliance of the mathematical model with real processes in the engine electromechanical equipment of mine.*

Results. *The experimental stand and the experimental sample of autonomous technical means for automatic disconnection of back-to-network power generation produced by induction motors in case of fault to its supply cable have been developed. This made it possible to simulate processes in the engine electrotechnical complex of mine and to measure the required values.*

Conclusion. *Experimental studies have confirmed the veracity of the obtained results of theoretical studies on the mathematical model.*

Keywords: *experimental stand, two-end power supply disconnection, adequacy of the mathematical model, mathematical expectation, autonomous technical means .*

Сведения об авторах

И.В. Ковалёва

SPIN-код: 5187-2555
 ORCID ID: 0000-0002-6437-5683
 Телефон: +7 (949) 334-91-00
 Эл. почта: visara85@mail.ru

Статья поступила 02.09.2022 г.

© И.В. Ковалёва, 2022

Рецензент д.т.н., проф. К.Н. Маренич

М.К. Маренич, И.Б. Гуляева /к.т.н./
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЁМКОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОСЕТИ УЧАСТКА ШАХТЫ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ТОКА В ЦЕПИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Установлена существенность влияния ёмкости изоляции силовых проводников гибких кабелей шахтной участковой электрической сети на величину токов в ветвях проводимости системы заземления участка шахты в случае возникновения цепи однофазной утечки тока на землю. Установлены условия формирования тока в сети заземления, который превышает нормируемую величину по критерию искробезопасности. Обоснована целесообразность изменения концепции построения системы электроснабжения участка шахты в части отказа от присоединения центральных проводников шахтных гибких экранированных кабелей к заземлениям при условии применения локальных средств выявления контакта фазы сети с корпусом электроустановки.

Ключевые слова: шахтная участковая электрическая сеть, ёмкость изоляции, заземляющая сеть, ток, моделирование, анализ, система электроснабжения, концепция построения, обоснование.

Постановка проблемы

Безопасность эксплуатации электрической сети технологического участка угольной шахты обеспечивается средствами противодействия условиям возникновения взрыва метано-воздушной смеси в атмосфере горной выработки и средствами защиты человека от электропоражения. В этой связи, в структуре системы электроснабжения участка предусмотрен комплекс специальных технических решений:

- конструкция металлических корпусов электрооборудования соответствует критериям взрывоустойчивости и взрывонепроницаемости;
- внешние сигнальные цепи соответствуют критерию искробезопасности;
- металлические корпуса стационарных электроустановок заземлены непосредственным подключением к элементам заземления;
- металлические корпуса перемещаемого электрооборудования заземлены через центральные проводники кабелей электропитания присоединением последних к заземлённым корпусам стационарных электроустановок;
- защита персонала от электропоражения при касании к фазному проводнику, находящемуся под напряжением, осуществляется аппаратурой защиты от утечек тока на землю (АЗ);
- с целью выявления повышенной проводимости изоляции фазного проводника кабеля электропитания в структуре системы электроснабжения участка шахты предусмотрены экранированные кабели, экраны изоляции фаз которых находятся в непосредственном контакте с заземлёнными центральными проводниками.

Таким образом, для защиты человека от электропоражения в условиях шахты предусмотрены технические решения как для случая касания к корпусу электроустановки, находящемуся под потенциалом фазы сети вследствие повреждения изоляции; так и для случая касания к фазному проводнику, находящемуся под напряжением.

Учитывая относительно малую величину сопротивления утечки тока на землю – тела человека (нормируемое значение: $R_{ут}=1$ кОм), следует отметить, что в результате его прикосновения к фазе сети возникнет эффект смещения потенциала нейтрали сети. Процесс будет сопровождаться не только протеканием тока по цепи утечки с фазы на землю, но и компонентам самой структуры системы заземления участка шахты, что предопределяется наличием и параметрами активных и ёмкостных проводимостей изоляции кабельной сети.

В связи с этим, научную и практическую актуальность представляет исследование степени влияния параметров изоляции и, в частности, ёмкости изоляции кабельных присоединений на величины токов в элементах структуры заземляющей сети с учётом пространственного распределения путей протекания токов в контексте установления степени соответствия величин этих токов критериям искробезопасности внешних электрических присоединений структуры электротехнического комплекса участка шахты.

Анализ исследований и публикаций

Проблематика обеспечения безопасности эксплуатации шахтных участковых

электротехнических комплексов в научной литературе не рассматривается в контексте применения устройств защиты от утечек тока на землю, включая вопросы повышения эффективности их защитной функции [1,2]. При этом, рассматривается регламентируемая нормативными документами [3] концепция построения системы электропитания участка шахты, предусматривающая применения системы заземления металлических корпусов как стационарного, так и перемещаемого электрооборудования, применение радиальных схем присоединения силовых гибких экранированных кабелей с заземляемыми центральными проводниками (заземляющими жилами). В исследованиях [4,5] обосновывается функциональная недостаточность применяемой концепции построения системы электроснабжения участка шахты в контексте противодействия формированию электропоражающего фактора. В частности, рассматривается эффект формирования значительных по величине ёмкостных проводимостей изоляции – цепей «фаза-земля» вследствие подключения к заземлению центральных проводников силовых гибких кабелей. Кроме этого, выявлены ограничения в формировании защитной функции структурных компонентов самих устройств защиты от утечек тока на землю.

В то же время, очевидным результатом появления цепи однофазной утечки тока на землю (вследствие касания человеком фазы сети) является смещение потенциала нейтрали и формирование токов в распределённых территориально ответвлениях системы заземления электросети участка шахты. Величины этих токов могут удовлетворять, либо не удовлетворять критериям искробезопасности [6,7], что предопределяет актуальность соответствующего исследования.

Цель исследования

Целью исследования является установление степени влияния ёмкостных составляющих проводимости изоляции кабельной сети участка шахты на формирование и распределение токов в участковой сети заземления в контексте выявления состояний, не удовлетворяющих критерию искробезопасности электрических цепей.

Результаты исследования

Заземляющая сеть системы электроснабжения технологического участка шахты представляет собой структуру проводимостей, территориально распределённую по площади размещения электрооборудования участка между точками присоединения к земле технических средств заземления. Наличие тока в сети заземления является следствием возникновения цепи однофазной

утечки (R_{ym}) на землю в случае повреждения изоляции фазного проводника, либо касания к фазному проводнику (находящемуся под напряжением сети) человека, имеющего контакт с землёй.

В этом случае нарушается симметрия сети, происходит смещение напряжения нейтрали, и напряжения фаз принимают значения:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}'_A &= \dot{U}_A - \dot{U}_N; \quad \Delta \dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_N; \\ \Delta \dot{U}'_C &= \dot{U}_C - \dot{U}_N \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{U}'_A; \dot{U}'_B; \dot{U}'_C$ – векторы фазных напряжений сети; \dot{U}_N – вектор напряжения смещения нейтрали сети при несимметрии нагрузки:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A Y_{A-3} + \dot{U}_B Y_{B-3} + \dot{U}_C Y_{C-3}}{Y_{A-3} + Y_{B-3} + Y_{C-3}} \quad (2)$$

С одной стороны, эти соотношения позволяют определить:

– ток, протекающий через человека (через сопротивление утечки):

$$\dot{I}_{ym} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_N}{R_{ym}}; \quad (3)$$

– ток через комплексное сопротивление ($Z=1/Y$) изоляции:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_N}{Z_{A-3}}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_N}{Z_{B-3}}; \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_N}{Z_{C-3}} \end{aligned} \quad (4)$$

Применительно к структуре системы заземления участка шахты токи, представленные выражениями (3, 4), предопределяют формирование соответствующих составляющих тока утечки на землю, распределённых в её ветвях проводимости.

Рассматривая процессы в сети заземления технологического участка шахты, введём следующие допущения:

– технологический комплекс участка шахты представлен электропотребителями (табл. 1), каждый из которых подключен к трёхфазной сети линейного напряжения 1140 В промышленной

частоты 50 Гц посредством одного шахтного экранированного гибкого кабеля марки КГЭШ. Параметры кабелей сведены в табл.1 [8];

– параметрами магистрального кабеля, связывающего выход трансформатора (TV1) участковой подстанции со входом радиальной схемы

Табл. 1. Параметры кабельных присоединений расчётной схемы электротехнического комплекса участка шахты

№ п/п	Наименование электропотребителя	Сечение силовой жилы кабеля марки КГЭШ, мм ²	Удельная ёмкость изоляции, (мкФ/фазу) /км	Длина кабеля, км	Ёмкость изоляции кабеля, мкФ/фазу
1	Комбайн очистной	70	0,870	0,35	0,3045
2	Конвейер лавы	50	0,670	0,35	0,2345
3	Конвейер штрека	50	0,670	0,10	0,0670
4	Маслостанция №1	35	0,520	0,05	0,0260
5	Маслостанция № 2	25	0,424	0,05	0,0212
6	Станция орошения	16	0,363	0,05	0,0182

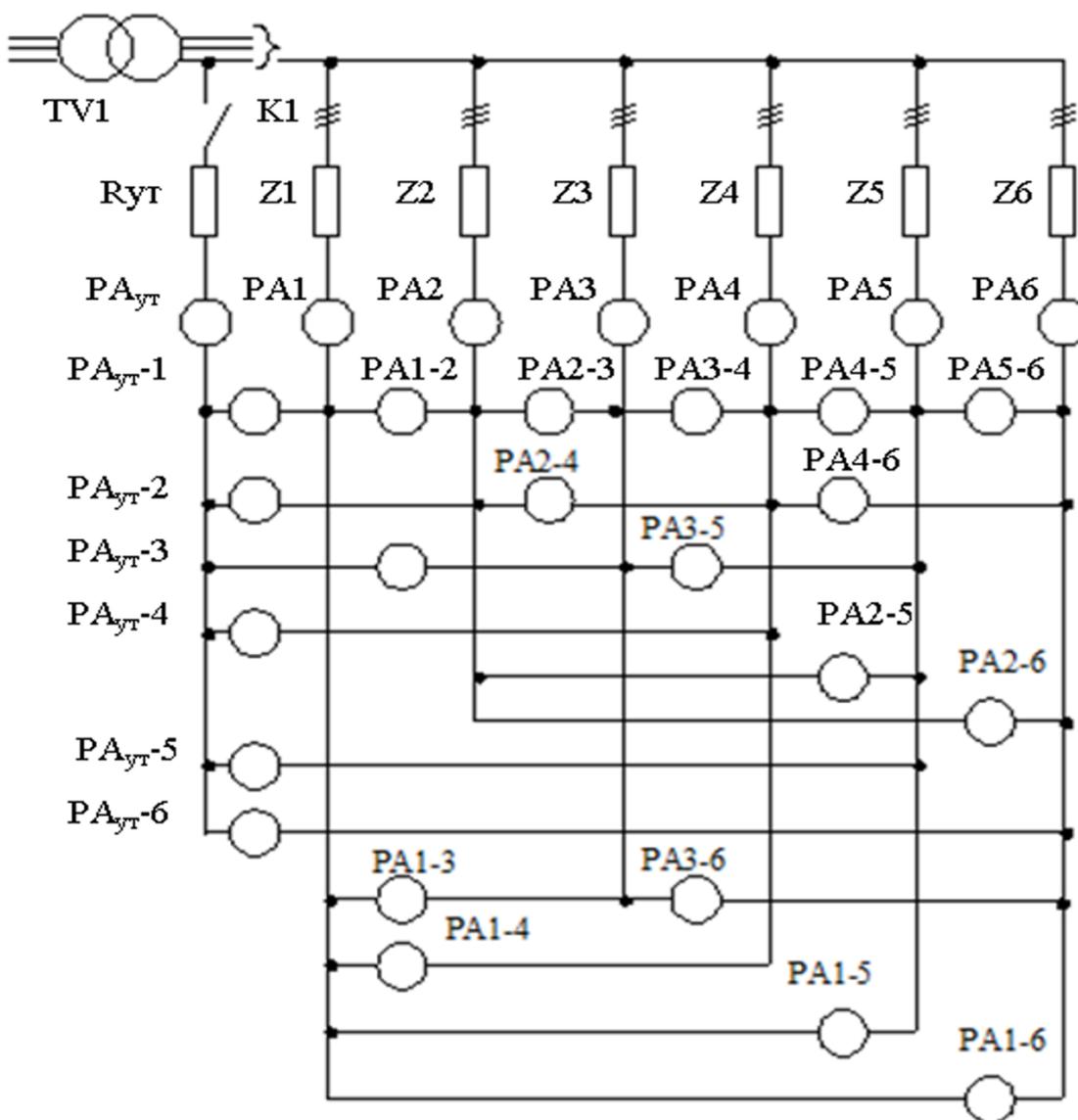


Рис. 1. Расчётная схема измерения токов в распределённых ветвях заземляющей сети участка шахты.

соединения гибких кабелей пренебрегаем в связи с малой протяжённостью последнего;

- активные ($R_{из}$) и ёмкостные ($X_{из}$) сопротивления изоляции каждого гибкого кабеля (между фазами и землёй) на расчётной схеме объекта исследования (рис. 1) могут быть представлены сосредоточенными комплексными величинами Z_i , структурно соответствующими схеме (рис. 2);

- ёмкостные сопротивления изоляции каждой фазы конкретного кабеля равны между собой, определяются структурой кабеля соответствующей марки, его сечением и протяжённостью, и соответствуют параметрам, приведенным в табл. 1;

- активные сопротивления изоляции кабелей зависят от их технического состояния. Принимаем, что активные сопротивления изоляции каждой фазы каждого кабеля равны между собой. В исследовании рассматриваем два варианта: $R_{из}=0,5$ мОм / фазу; $R_{из}=1,0$ мОм/фазу;

- активными сопротивлениями элементов заземляющей сети пренебрегаем в виду их предельно малых величин;

- прикосновение к фазе сети человека, имеющего контакт с землёй, имитируется замыканием контакта К1 (рис. 1), соединяющим цепь утечки (R_{ym}) на землю;

- с учётом возможных различий физических состояний человека, принимаем величину его сопротивления в фиксированных значениях: $R_{ym}=1,0$ кОм; $R_{yt}=0,8$ кОм; $R_{ym}=1,2$ кОм;

- вычисление величин токов в заземляющей сети производим в её ветвях в соответствии с расчётной схемой (рис. 1) в местах подключения амперметров (PA_i) методом компьютерного моделирования [9] с учётом стационарности процесса, синусоидальности, периодичности симметрии в фазах и полуволнах токов сети.

Результаты моделирования сведены в табл. 2. Для сравнения в колонке 3 данной таблицы приведены величины токов в ветвях сети заземления участка шахты (рис. 1) при $R_{ym}=1,0$ кОм, величинах активного сопротивления изоляции каждого фазного проводника каждого кабеля $R_{из}=0,5$ мОм для случая полной компенсации ёмкости изоляции (отсутствия ёмкости изоляции) фаз сети ($C_{из}=0$ мкФ/фазу; $X_{из}=\infty$).

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы относительно процессов в шахтной участковой сети заземления, обусловленных возникновением цепи однофазной утечки тока на землю:

- активные сопротивления изоляции фазных проводников шахтных силовых гибких кабелей, соответствующие по величине техническим условиям их эксплуатации, не оказывают

существенного влияния на величину токов в ветвях проводимостей участковой системы заземления;

- существенное влияние на величину токов в ветвях проводимостей системы заземления технологического участка шахты оказывают ёмкости изоляции фазных проводников силовых гибких кабелей (образуемые между фазными проводниками и землёй);

- электропитание потребителей высокой мощности предполагает применение силовых гибких кабелей, отличающихся высоким уровнем параметра ёмкости изоляции, что, в свою очередь, предопределяет формирование относительно высокого уровня токов в ветвях проводимости системы заземления, проходящих между точками заземления электропотребителей высокой мощности;

- если сопротивление человека, прикоснувшегося к фазе сети (сопротивление однофазной утечки на землю), оказывается меньшим нормативно регламентируемой величины ($R_{ym}=1,0$ кОм), это обуславливает увеличение токов в ветвях проводимости сети заземления;

- зафиксированные величины токов в ветвях проводимости сети заземления, прилегающих к точкам заземления электрооборудования высокой мощности (электропитание осуществляется посредством силовых кабелей больших сечений и протяжённостей, т.е., обладающих высокими величинами ёмкости изоляции), превышают предельно допустимые значения, отвечающие критериям искробезопасности, в соответствии с которыми допустимые уровни энергии в искробезопасной электрической цепи простираются от 20 до 180 мкДж, что соответствует максимальному напряжению разомкнутой электрической цепи 36 В, значению тока короткого замыкания 120 мА, допустимой мощности 0,45 Вт) [6,7].

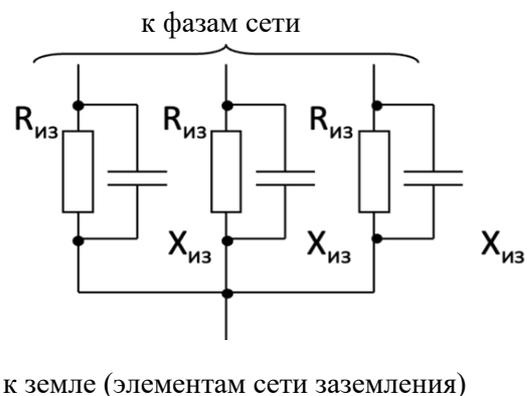


Рис. 2. Структура комплексного сопротивления изоляции кабельного присоединения Z_i расчётной схемы по рис. 1

Табл. 2. Результаты вычисления токов в ветвях сети заземления (рис. 1) при возникновении цепи утечки ($R_{ут}$) тока на землю

№ п/п	Обозначение амперметра	Показания амперметров, mA						
		C _{из} = 0 мкФ/фазу (X _{из} = ∞) R _{из} = 0,5 МОм/фазу R _{ут} = 1,0 кОм	C _{из} >> 0 мкФ/фазу (соответствует табл. 1)					
			R _{из} = 0,5 МОм/фазу			R _{из} = 1,0 МОм/фазу		
			R _{ут} (кОм):			R _{ут} (кОм):		
		0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	РА _{УТ}	22,93	368,60	347,9	327,00	372,40	351,90	331,00
2	РА1	3,822	167,00	157,60	148,10	168,80	159,50	150,10
3	РА2	3,822	128,60	121,40	114,10	130,0	122,91	115,60
4	РА3	3,822	36,89	34,81	32,72	37,19	35,14	33,05
5	РА4	3,822	14,66	13,84	13,01	14,52	13,72	12,91
6	РА5	3,822	12,12	11,44	10,75	11,88	11,23	10,56
7	РА6	3,822	10,56	9,96	9,361	10,24	9,675	9,101
8	РА _{УТ} -1	3,822	76,50	72,19	67,86	77,32	73,06	68,72
9	РА _{УТ} -2	3,822	71,03	67,03	63,00	71,78	67,82	63,80
10	РА _{УТ} -3	3,822	57,93	54,66	51,38	58,52	55,29	52,01
11	РА _{УТ} -4	3,822	16,33	15,64	14,84	16,27	15,22	14,12
12	РА _{УТ} -5	3,822	54,35	51,29	48,20	54,89	51,86	48,78
13	РА _{УТ} -6	3,822	54,11	51,07	48,00	54,65	51,64	48,57
14	РА1-2	0	5,482	5,173	4,862	5,545	5,239	4,928
15	РА1-3	0	18,60	17,55	16,50	18,81	17,77	16,72
16	РА1-4	0	21,81	20,58	19,34	22,06	20,84	19,61
17	РА1-5	0	22,18	20,94	19,68	22,44	21,20	19,95
18	РА1-6	0	22,42	21,16	19,89	22,68	21,43	20,16
19	РА2-3	0	13,12	12,38	11,63	13,27	12,54	11,79
20	РА2-4	0	16,33	15,41	14,48	16,52	15,60	14,68
21	РА2-5	0	16,70	15,76	14,82	16,90	15,96	15,02
22	РА2-6	0	16,94	15,98	15,03	17,13	16,19	15,23
23	РА3-4	0	3,211	3,030	2,848	3,248	3,068	2,886
24	РА3-5	0	3,587	3,385	3,181	3,628	3,428	3,224
25	РА3-6	0	3,821	3,606	3,390	3,865	3,652	3,436
26	РА4-5	0	0,376	0,355	0,333	0,380	0,359	0,338
27	РА4-6	0	0,611	0,576	0,542	0,618	0,584	0,549
28	РА5-6	0	0,235	0,222	0,208	0,238	0,225	0,211

Таким образом, совпадение состояния электрической сети участка шахты с наличием цепи утечки тока на землю с состоянием нарушения контакта в элементах цепи заземления может спровоцировать искрение, что представляет собой потенциальную опасность взрыва метано-воздушной смеси в шахтной атмосфере.

Из анализа структуры компонентов электротехнического комплекса участка шахты [4,5] следует, что формирование ёмкостных проводимостей между фазами кабельной сети и землёй является следствием присоединения к заземлению центральных проводников шахтных гибких экранированных кабелей, играющих роль заземляющих жил для присоединения к заземлению металлических корпусов электрооборудования, перемещаемого в процессе эксплуатации. Таким образом, обязательное [3] присоединение

центральных проводников гибких кабелей в сети заземления системы электроснабжения участка шахты априори обуславливает формирование токов в заземляющей сети участка шахты, сопоставимых по величине с токами, способными вызвать искрение в местах случайного разъединения проводников цепи заземления, т.е., превысить минимальные воспламеняющие токи, определяемые ГОСТ 30852.10-2002; ГОСТ Р МЭК 60079-11 – 2010 [6,7]. Это позволяет утверждать о целесообразности изменения концепции построения системы электроснабжения участка шахты в части отказа от присоединения центральных проводников шахтных гибких экранированных кабелей к заземлениям при условии применения локальных средств выявления контакта фазы сети с корпусом электроустановки, перемещаемой в процессе эксплуатации с функцией

защитного отключения. Соответствующие технические решения разработаны [4].

Выводы

Установлена существенность влияния ёмкости изоляции силовых проводников гибких кабелей шахтной усатковой электрической сети на величину токов в ветвях проводимости системы заземления участка шахты в случае возникновения цепи однофазной утечки тока на землю.

Зафиксированы величины токов в ветвях проводимости сети заземления, прилегающих к точкам заземления электрооборудования высокой мощности, превышающие предельно допустимые значения, отвечающие критериям искробезопасности.

Обоснована целесообразность изменения концепции построения системы электроснабжения участка шахты в части отказа от присоединения центральных проводников шахтных гибких экранированных кабелей к заземлениям при условии применения локальных средств выявления контакта фазы сети с корпусом электроустановки.

Список литературы

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
2. Вареник Є.О. Обмеження та захист від витоків струму у рудникових електроустановках напругою 1200 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Вареник Євген Олександрович. – Днепропетровск, 2004. – 191 с.
3. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. – [Вступил в силу 01.01.79]. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 13 с. – (Межгосударственный стандарт).

4. Денисова Е.В. Специфика заземления электрооборудования участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения / Е.В. Денисова, И.Б. Гуляева, М.К. Маренич – Горная промышленность. Научно-техн. и производств. журнал, 2022, №4. – С. 110-118.
5. Гуляева И.Б. Анализ эффективности защитной функции автокомпенсатора ёмкостного тока в структуре аппарата защиты серии «АЗУР-1» / И.Б. Гуляева, Е.С. Дубинка, М.К. Маренич. – Вестник ДонНТУ, Вып 1(27)2022. – С. 50-60.
6. Электрооборудование взрывозащищённое. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь. Electrical apparatus for explosive atmospheres. Part 11. Intrinsic safety. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 30852.10-2002 (МЭК 60079-11:1999). МКС 29.260.20 Дата введения 2014-02-15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200103397?marker=7D20K3>. – Загл. с экрана.
7. Взрывоопасные среды. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i». IEC 60079-11:2011 Explosive atmospheres — Part 11: Equipment protection by intrinsic safety «i» (IDT). ГОСТ Р МЭК 60079-11 – 2010. Национальный стандарт Российской Федерации. Дата введения 2010-11-30. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293801/4293801459.pdf>. – Загл. с экрана.
8. Сидоренко И.Т. Проектирование электрооборудования горных предприятий: учебное пособие / И.Т. Сидоренко и др. – Москва: Волгодга: Инфра-Инженерия, 2021. – С. 124.
9. Чернышов Н.Г. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench: учебное пособие / Н.Г. Чернышов, Т.И. Чернышова/ Тамбов, Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 52 с.

M.K. Marenich, I.B. Guliaeva /Cand. Sci. (Eng.)/ Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE INSULATION CAPACITY OF THE ELECTRICAL NETWORK OF THE MINE SITE AS A FACTOR IN THE FORMATION OF CURRENT IN THE GROUNDING CIRCUIT

Background. The relevance of the study is justified by the need to identify the degree of influence of the insulation capacity of the cables of the mine district electrical network on the magnitude of currents in the branches of the conductivity of the grounding network .

Materials and/or methods. the results of the study of the nature of the influence of the insulation capacity of the cables of the mine district electrical network on the values of currents in the branches of the

conductivity of the grounding system in the conditions of the occurrence of a single-phase leakage current to the ground are presented.

Results. The significance of the influence of the insulation capacity of the power conductors of flexible cables of the mine usatkov electric network on the magnitude of currents in the conduction branches of the grounding system of the mine in the event of a single-phase leakage current to the ground.

The values of currents in the conduction branches of the grounding network adjacent to the grounding points of high-power electrical equipment exceeding the maximum permissible values that meet the intrinsic safety criteria are recorded.

The expediency of changing the concept of building a power supply system for a mine site is justified in terms of refusing to connect the central conductors of mine flexible shielded cables to earths, provided that local means of detecting the contact of the network phase with the electrical installation housing are used.

Conclusion. As a result of the study, a significant influence of the insulation capacity of the cables of the electrical network of the mine site on the magnitude of currents in the conduction branches of the grounding system was established. The conditions for the formation of a current in the grounding network that exceeds the normalized value according to the intrinsic safety criterion are established. The expediency of changing the concept of building a power supply system for a mine site is justified in terms of refusing to connect the central conductors of mine flexible shielded cables to earths, provided that local means of detecting the contact of the network phase with the electrical installation housing are used.

Keywords: mine precinct electrical network, insulation capacity, grounding network, current, modeling, analysis, power supply system, construction concept, justification.

Сведения об авторах

М.К. Маренич

SPIN-код: 7697-9855
Телефон: +7 (949) 328-05-79
Эл. почта: marenich_mk@mail.ru

И.Б. Гуляева

SPIN-код: 7065-0724
ORCID iD: 0000-0001-8215-4297
Телефон: +7 (949) 332-75-75
Эл. почта: iraguliaeva@gmail.com

Статья поступила 01.09.2022 г.
© М.К. Маренич, И.Б. Гуляева, 2022
Рецензент д.т.н., проф. Ковалёв А.П.

УДК 621.313

К.Н. Маренич /д.т.н./, А.И. Денисова
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНЫЙ РУДНИЧНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Рассмотрены вопросы, относящиеся к проблематике подавления электропоражающего фактора, обусловленного действием обратной ЭДС асинхронного двигателя после отключения напряжения питания. Предложено концептуальное решение в контексте дооснащения асинхронного двигателя устройством контроля состояния изоляции в силовом присоединении кабеля электропитания и компактным устройством разъединения цепи «звезда» обмоток статора в процессе защитного отключения. Представлен сопоставительный анализ эффективности вариантов схем реализации защитной функции.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, обратная ЭДС, электропоражающий фактор, коммутация обмоток статора, варианты схем, исследование

Постановка проблемы

В настоящее время электробезопасность эксплуатации шахтных участковых электрических сетей обеспечивается комплексным техническим решением применения: защитного заземления металлических корпусов силового электрооборудования; аппаратов защиты от утечек тока на землю. Последние входят в структуру участковых трансформаторных подстанций и формируют команду на отключение их автоматических выключателей (на стороне низшего напряжения) в момент касания человеком фазного проводника, находящегося под напряжением (т.е. появления цепи утечки $R_{ут}$ тока на землю). Однако защитное отключение силовых электроустановок не является достаточным в контексте обеспечения безопасности их эксплуатации (в части защиты человека от электропоражения). Применяемая повсеместно концепция защитного отключения электрооборудования технологического участка шахты не предусматривает функцию обесточивания силовых цепей электротехнического комплекса подавлением обратных энергетических потоков асинхронных двигателей (АД) потребителей, находящихся в состоянии выбега после отключения питающего напряжения.

Таким образом, асинхронный двигатель электропривода рудничной технологической установки следует рассматривать как источник формирования электропоражающего фактора на интервале времени, следующем за отключением напряжения участковой электросети. В этом случае защитное действие (в дополнение к штатным средствам защиты) должно предполагать:

– выявление цепи повышенной проводимости с фазы на землю (цепи утечки) техническими средствами, действующими непосредственно со

стороны асинхронного двигателя и функционально не зависящими от технических средств защиты, предусмотренных со стороны участковой трансформаторной подстанции;

– отделение от кабельной сети участка шахты обратной ЭДС асинхронного двигателя техническими средствами коммутации силовых электрических цепей.

Применительно к шахтным участковым электротехническим комплексам наиболее приемлемым техническим решением является объединение указанных дополнительных защитных функций в одном устройстве, непосредственно адаптированном в структуру самого асинхронного двигателя электропривода рудничной технологической установки. Это позволит:

– исключить возможность повреждения электрических соединений обмоток статора АД и устройства защитного подавления его обратного энергетического потока;

– распространить данную защитную функцию на электродвигатели рудничных машин, перемещаемых в процессе эксплуатации.

В этом случае асинхронный двигатель горной машины в дополнение к своей основной функции создания вращающего электромагнитного момента приобретёт функцию автоматического выявления опасного состояния присоединения кабеля электропитания с последующим подавлением обратного энергетического потока в процессе защитного отключения, что представляет собой новое концептуальное решение: «электробезопасный асинхронный двигатель».

Анализ исследований и публикаций

Теория формирования обратной ЭДС асинхронного двигателя в процессе его перехода в

режим выбега (после отключения напряжения в электрической сети) раскрыта в работах [1,2]. Её анализ позволяет сделать вывод о наличии зависимости продолжительности обратной ЭДС от мощностных параметров двигателя, косвенно связанных с параметрами индуктивности и активного сопротивления его обмоток и, как следствие, – формировании продолжительного электропоражающего фактора в шахтных участковых электротехнических комплексах, оснащённых асинхронными двигателями высокой мощности, после отключения напряжения питания. Это предположение подтверждается исследованием переходных процессов в шахтных участковых многомашинных электротехнических комплексах, где рассмотрены особенности формирования обобщённых ЭДС (в качестве электропоражающего фактора), обусловленных воздействием обратных энергетических потоков асинхронных электрических машин разного уровня мощности [3]. В исследовании [4] обоснована концепция выявления аварийного (опасного) состояния в кабеле электропитания асинхронного двигателя автономным устройством, действующим непосредственно со стороны ввода обмоток его статора. Проблематика практической реализации процесса защитного подавления обратного энергетического потока АД (вследствие появления соответствующего информационного сигнала от автономного устройства контроля состояния кабеля электропитания) рассмотрена в исследовании [5]. Здесь сделан акцент на возможности использования режима индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя в качестве процесса подавления его обратной ЭДС. Однако техническая реализация такого режима предполагает применение отдельного громоздкого (рудничное взрывозащищённое исполнение) и дорогостоящего силового коммутационного аппарата, основу которого составляет трёхфазный тиристорный коммутатор, содержащий дополнительно от одного до двух силовых тиристоров коммутации цепи замещения ЭДС вращения двигателя.

Такое техническое решение в принципе не может быть использовано применительно к электродвигателям горных машин, перемещаемых в процессе эксплуатации (очистные комбайны, забойные скребковые конвейера и т.п.). В целом же, расположение силового устройства подавления обратного энергетического потока АД отдельно от самого двигателя предполагает наличие вероятности невыполнения возложенной на данное устройство защитной функции по причинам:

– возможного повреждения электрических соединений данного устройства и силовых цепей статора двигателя;

– неподключения (вследствие ошибочных действия персонала) данного устройства к силовым цепям статора двигателя.

Таким образом, научную и практическую актуальность представляет задача обоснования концепции электробезопасного рудничного асинхронного двигателя, содержащего в своей структуре (помимо элементов, обеспечивающих формирование вращающего электромагнитного момента) технические средства контроля состояния кабеля электропитания и управления подавлением обратного энергетического потока в процессе защитного отключения. При этом, действия данных технических средств должны выполняться в автоматическом режиме и не быть подчинены воздействию штатных средств защиты, функционирующих со стороны участковой трансформаторной подстанции.

Цель исследования

Целью исследования является обоснование концептуального решения в части структуры рудничного асинхронного двигателя, реализующего функцию выявления опасного состояния силовой цепи кабеля электропитания с последующим подавлением обратного энергетического потока в процессе защитного отключения (концепция электробезопасного рудничного асинхронного двигателя).

Результаты исследования

Ввод в структуру асинхронного двигателя устройства подавления его обратного энергетического потока может быть реализован на основе анализа возможности изменения его конструкции (рис. 1) [6] путём размещения соответствующего дополнительного функционального узла (ДФУ). При этом, местом размещения ДФУ может служить металлическая коробка в рудничном взрывозащищённом исполнении [7], аналогичная по конструкции вводной коробке кабельного ввода электродвигателя, пускателя и т.п. (рис. 2) [6,8]. Ограниченные размеры короба и способ его размещения на внешней стороне корпуса асинхронного двигателя обуславливают необходимость применения в структуре ДФУ компактного силового коммутационного устройства. Применительно к контактору, этим исключается возможность использования трёхполюсного, а также двухполюсного коммутационного аппарата. А учитывая, что поток охлаждающего воздуха от вентилятора (поз. 5, рис. 1), будучи направленным вдоль рёбер теплоотвода корпуса двигателя, не обтекает дополнительные короба (пример – поз. 7, рис. 1), в качестве приоритетного (в отношении ДФУ) следует рассматривать техническое

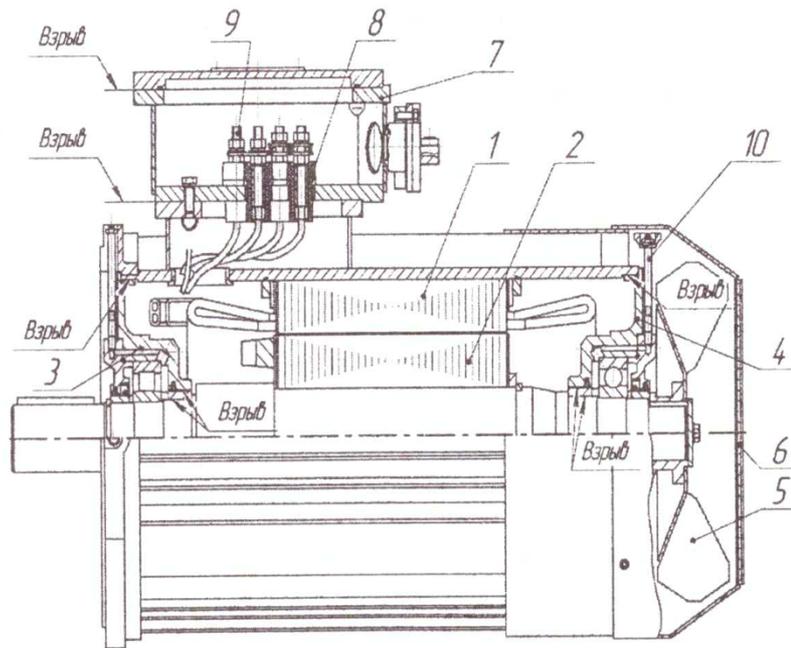


Рис. 1. Компонновка рудничного асинхронного двигателя 2АКДВ250М4:
 1 – статор; 2 – ротор; 3, 4 – подшипниковые щиты; 5 – вентилятор; 6 – кожух; 7 – коробка кабельного ввода; 8 – изолятор; 9 – силовой зажим; 10 – устройство для пополнения смазки

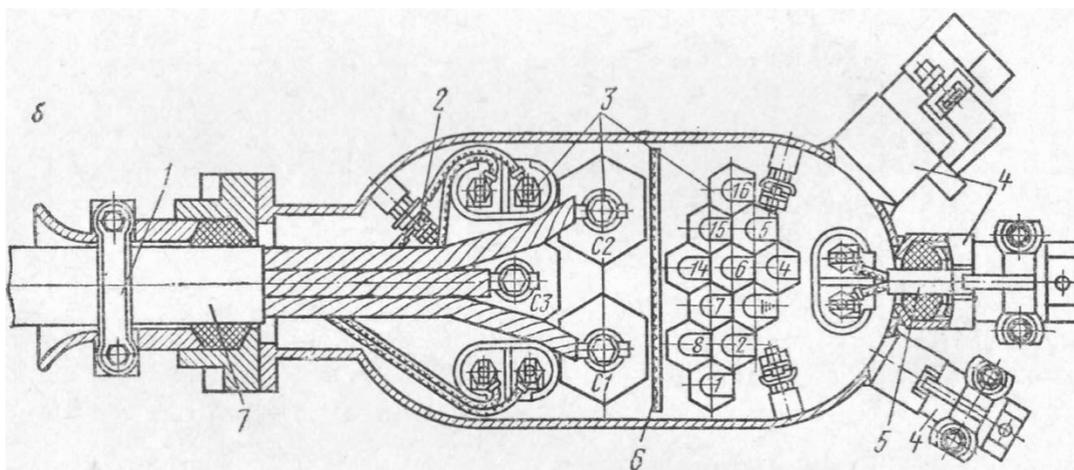


Рис. 2. Общий вид коробки кабельного ввода рудничного электроаппарата во взрывозащищённом исполнении:
 1 – кабельная муфта ввода силового кабеля 7; 2 – заземляющий зажим;
 3 – проходные зажимы (контакты); 4 – устройство ввода кабеля 5 контрольных цепей;
 6 – перегородка

решение, в котором возможное применение силовых полупроводниковых приборов будет связано с кратковременным включением их в работу – на интервале времени подавления обратного энергетического потока АД (что не приведёт к перегреву последних).

Размещение дополнительного короба на внешней стороне корпуса двигателя согласуется с практикой применения рудничных асинхронных электрических машин [9] на примере электродвигателей с фазным ротором (двигатели

серии ВРК; ВАОК, рис. 3а), оснащённых двумя коробками кабельных вводов. Кроме этого, кабельные вводы могут быть вынесены от корпуса статора двигателя (двигатели серии ВРМ, расположение коробок кабельных вводов на цилиндрических основаниях, рис. 3б) [6]. Критерию минимизации габаритов дополнительного функционального устройства соответствует применение в его структуре однополюсного вакуумного контактора SPVC-630 [10] и диодно-диодного модуля серии МДД [11] (рис. 4) в качестве силовых

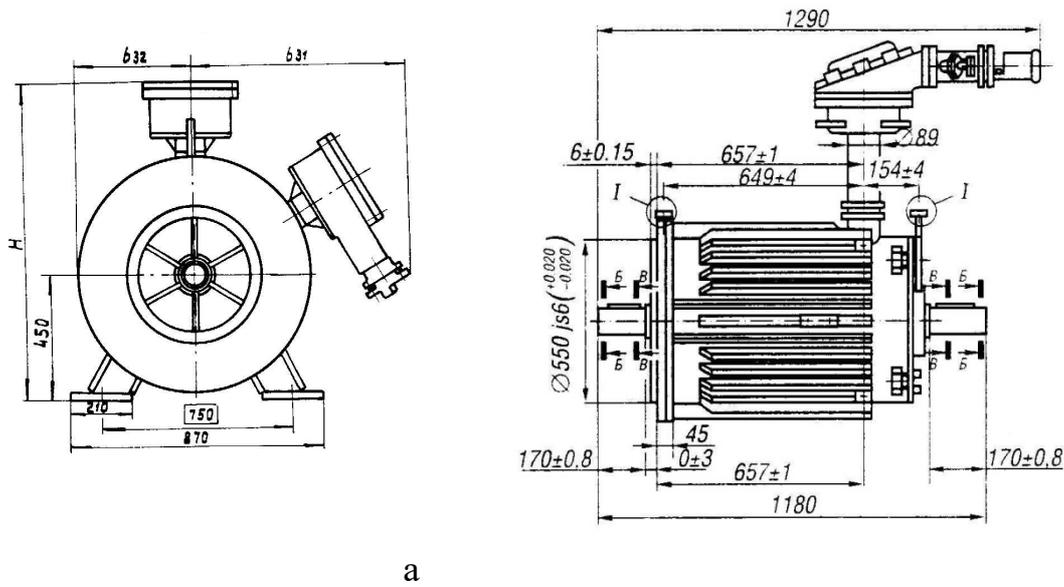


Рис. 3. Варианты размещения коробок кабельных вводов на корпусах асинхронных двигателей ВАОК (а) и ВРМ (б)

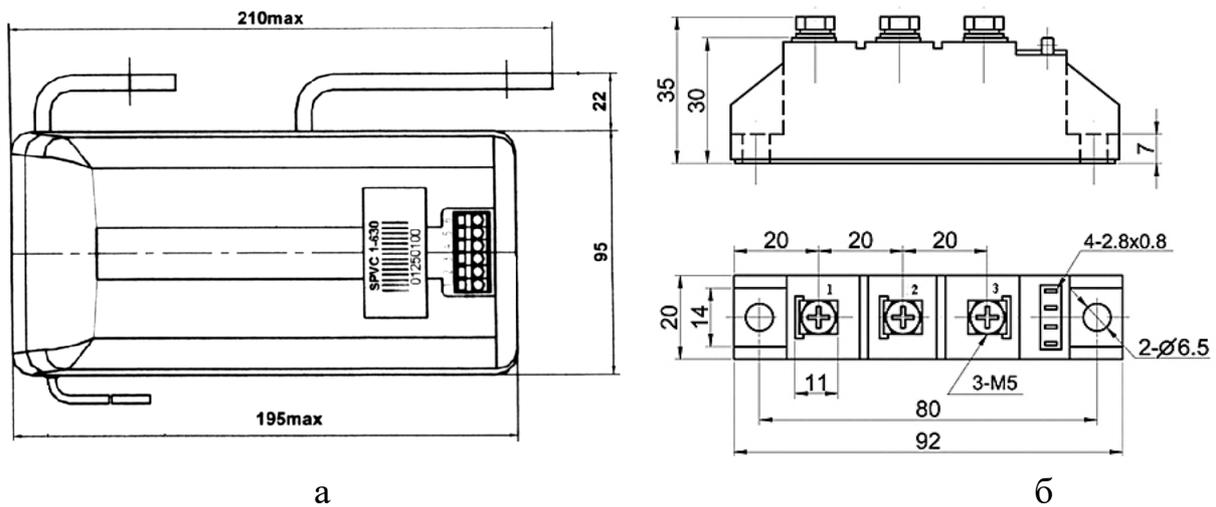


Рис. 4. Компоненты силовой схемы дополнительного функционального устройства а – вакуумный контактор SPVC (выпускаемый в производстве Российской Федерации); б – диодный модуль серии МДД

коммутационных элементов электрической схемы.

Техническим решением задачи выявления аварийного (опасного) состояния кабеля электропитания АД с последующим подавлением обратного энергетического потока является схема, представленная на рис. 5.

Участковая трансформаторная подстанция 1 представлена такими структурными элементами, как: силовой трансформатор 2, автоматический выключатель 3 и аппарат 4 защиты от утечек тока на землю (заземление представлено структурным элементом 5). Статор 6 АД представлен фазными обмотками 7, соединёнными в схему «звезда» посредством размыкаемого силового контакта 8 и

диодов VD1, VD2. Цепь выявления утечки (R_{ym}) тока на землю, предназначенная для использования в структуре АД, состоит из конденсаторов C1, C2, диода VD3, а также резистора R2, присоединённого параллельно конденсатору C2.

Таким образом, команда на защитное подавление обратного энергетического потока АД, снимаемая в виде импульса напряжения на резисторе R2, приводит к срабатыванию реагирующий орган 9 и коммутационный аппарат 10. Последний разомкнёт силовой контакт 8 и замкнёт слаботочный контакт 11, разрядив конденсатор C1 через резистор R1 и подготовив, тем самым, измерительную цепь C1 – C2 – VD3 к последующему использованию. Разъединение контакта 8

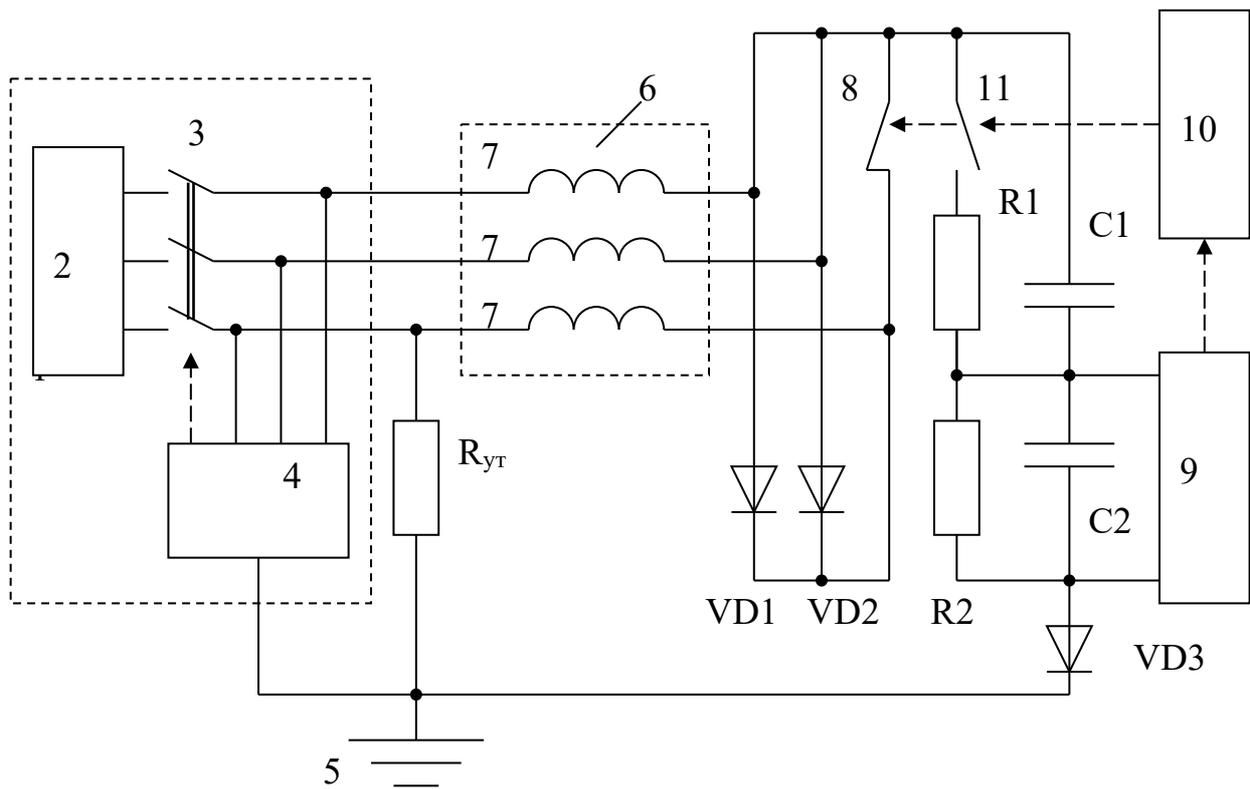


Рис. 5. Схема устройства коммутации цепи подключения обмоток статора асинхронного двигателя в процессе подавления обратного энергетического потока при возникновении утечки тока на землю

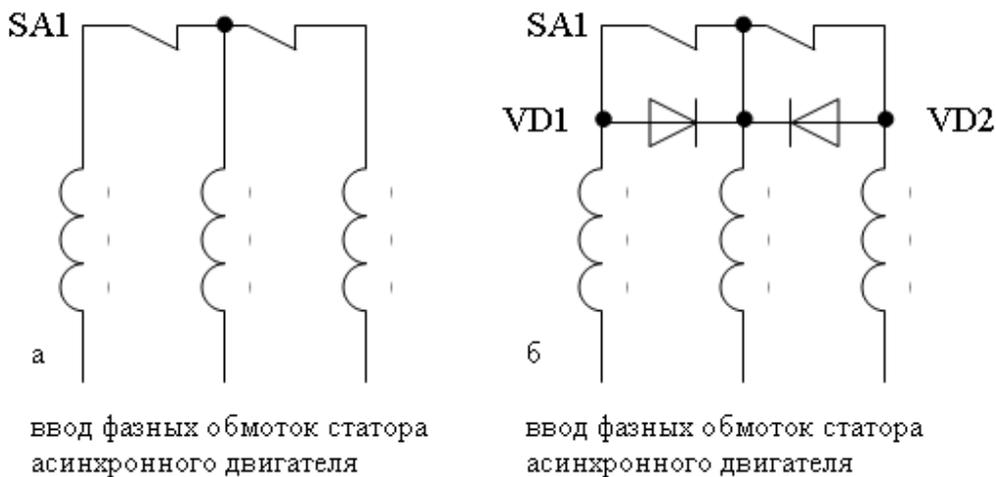


Рис. 6. Варианты схем коммутации цепи «звезда» фазных обмоток статора асинхронного двигателя на основе применения двухполюсного автоматического выключателя

нарушит целостность схемы «звезда» соединения обмоток статора АД, а схема присоединения диодов VD1, VD2 к фазным обмоткам статора создаст эффект протекания выпрямленного тока по обмотке статора, соединённой с катодами диодов VD1, VD2, что способствует снижению величины формируемого вращающего электромагнитного момента АД на интервале времени, когда ещё не прекращена подача напряжения на статор. Кратковременность протекания тока по силовым

диодам VD1, VD2 не приведёт к их перегреву, что исключит необходимость применения средств их охлаждения.

Рассматривая особенности функционирования схемы (рис. 5), следует отметить, что после срабатывания защиты (разъединения контакта 8) электропоражающий фактор на вводе статора АД не будет устранён мгновенно, поскольку сохранится соединение выводов обмоток двух фаз статора, присоединённых к анодам диодов VD1,

VD2. Таким образом, схема (рис. 5) может быть рассмотрена только в качестве концепции. Проблематичным также представляется применение контактора в качестве исполнительного силового коммутационного устройства, поскольку его исходное отключенное состояние предопределяет необходимость применения устройства управления его включением и, собственно, включение контактора предварительно перед включением в работу асинхронного двигателя.

Развитием предложенной концепции является схема коммутации соединения «звезда» обмоток статора АД двухполюсным автоматическим выключателем (рис. 6). Компактность конструкции автоматического выключателя типа АЗ711Б (320x157x112 мм), рассчитанного на работу в

сетях линейного напряжения 660 В и 1140 В при номинальном токе до 160 А включительно [12], позволяет рассматривать это техническое решение применительно к рудничным асинхронным двигателям малой и средней мощности.

В этом соответствии со схемой (рис. 6) автоматический выключатель SA1 может находиться продолжительно во включенном состоянии (что соответствует штатному режиму эксплуатации АД) без применения дополнительных средств управления. Его отключение осуществляется подачей импульса тока в цепь независимого расцепителя, что согласуется с функционированием реагирующего органа 9 (рис. 5). Отключение автоматического выключателя SA1 приводит к разрыву цепи трёхфазного соединения обмоток

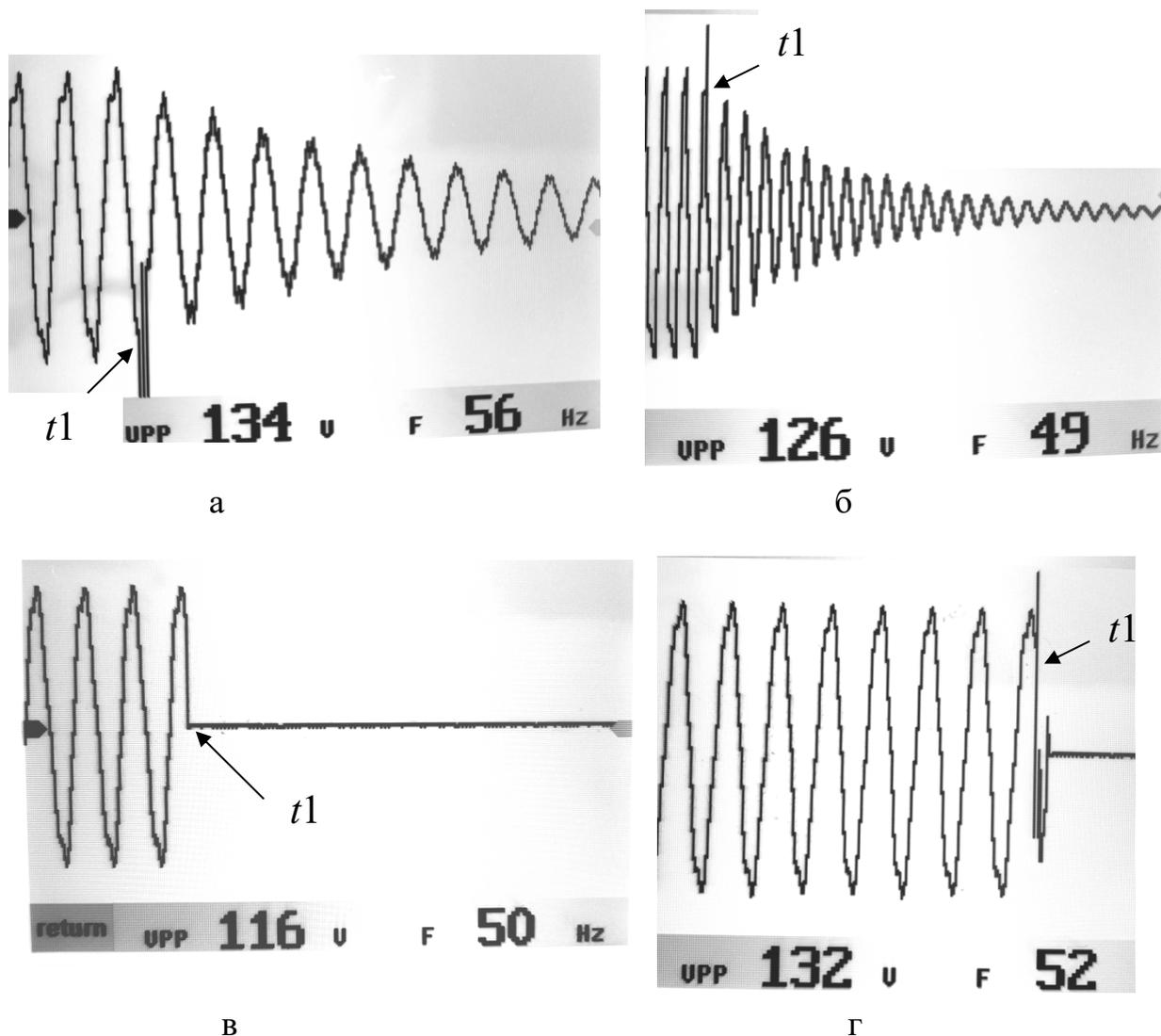


Рис. 7. Осциллограммы напряжений на резисторе – имитаторе сопротивления утечки тока на землю в вариантах схем коммутации обмоток статора асинхронного двигателя: а, б – по рис. 5; в – по рис. 6а; г – по рис. 6б; параметр VPP – разность потенциалов между амплитудами положительных и отрицательных значений напряжений; t1 – момент срабатывания устройства разъединения цепи «звезда» фазных обмоток статора асинхронного двигателя

статора АД и прекращению тока в этих обмотках и в соответствующих фазах защищаемого силового присоединения.

Кроме этого, цепь силового исполнительного устройства может быть дополнена встречно соединёнными диодами VD1, VD2 (рис. 6б), формирующими постоянные токи в каждой фазе статора АД (что эффективнее в сравнении со схемой по рис. 5), создавая условия для режима динамического торможения двигателя в случае срабатывания защиты. Кратковременность протекания тока в цепи диодов (на интервале динамического торможения АД) не требует применения средств их охлаждения, что сохраняет компактность силовой схемы и согласуется с предложенной концепцией применения средств коммутации цепи «звезда» обмоток статора АД в контексте противодействия формированию электропоражающего фактора в цепи силовых присоединений.

Эффективность вариантов реализации концептуального технического решения в контексте подавления электропоражающего фактора, образуемого обратной ЭДС АД проверена на физической модели, соответствующей рис. 5, где в качестве электрической машины использован асинхронный двигатель DK16N мощностью 1,5 кВт с параметрами: напряжение питания $\Delta / Y : 220 / 380$ В; $\cos \varphi = 0,84$; частота вращения ротора номинальная 1420 об/мин.

В структуре физической модели принято сопротивление утечки $R_{ym} = 0,75$ кОм; активные сопротивления изоляции и ёмкости изоляции (относительно земли), соответственно, 150 кОм/фазу и 0,6 мкФ/фазу. В процессе экспериментов асинхронный двигатель работал без нагрузки на валу, что является условием формирования максимальных продолжительностей обратных ЭДС при его отключении от сети. Падения напряжения на сопротивлении утечки (цепь «фаза – земля») в момент срабатывания защиты (отключения напряжения, подаваемого на статор АД и синхронного разъединения силового контакта 8 (по рис. 5); контактов SA1 (по рис. 6) фиксировались электронным осциллографом YEAPOOK ADS5012h и приведены на рис. 7.

Выводы

Анализ осциллограмм показывает, что эффект мгновенного отделения обратной ЭДС асинхронного двигателя от силового присоединения кабеля электропитания может быть достигнут синхронным размыканием соединения «звезда» фазных обмоток статора (рис. 6а, рис. 7в). Это позволяет решить задачу создания электробезопасного асинхронного двигателя (в т.ч., рудничного исполнения) на основе адаптации в его

структуру компактного устройства выявления аварийного (опасного) состояния кабеля электропитания и коммутации схемы «звезда» обмоток статора.

В качестве коммутационного устройства в этом случае приемлемо использовать двухполюсный автоматический выключатель, что подтверждается наличием серийных компактных аппаратов данного типа и согласуется с эксплуатационными требованиями:

- продолжительное поддержание замкнутого состояния контактов коммутационного устройства без дополнительных управляющих воздействий (штатный режим работы двигателя);

- разъединение контактов коммутационного устройства кратковременным воздействием на его независимый расцепитель срабатыванием функционального узла выявления аварийного (опасного) состояния в кабеле электропитания двигателя.

Применение диодов по схеме (рис. 6б) позволяет создать цепи постоянного тока в фазах статора асинхронного двигателя в процессе защитного отключения, однако это сопровождается формированием кратковременных импульсов тока в цепи утечки тока на землю (рис. 7г) после разъединения контактов коммутации цепи «звезда» обмоток статора.

Применение однополюсного коммутационного устройства с диодной схемой формирования однополярного тока в одной обмотке статора АД (по рис. 5) не позволяет достичь эффекта подавления обратной ЭДС двигателя и торможения его ротора, что подтверждается осциллограммами (рис 7а, б).

Список литературы

1. Ковач К.П. переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мимикоянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985.– 136 с.
3. Василец С.В. Математичне моделювання перехідних процесів в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексах: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 /Василець Святослав Володимирович. – Донецьк, 2010.– 194 с.
4. Маренич К.Н. Синхронное двустороннее обесточивание повреждённого участка кабеля шахтной участковой электросети / К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва // Уголь Украины: научный журнал. – Киев, 2011. – Вып. №5. – С. 53-54.

5. Дубинка Е.С. Обоснование безопасных режимов работы шахтных электрических сетей на основе управления параметрами обратных ЭДС электропотребителей: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 /Дубинка Екатерина Сергеевна, – Донецк, 2020. – 155 с.
6. Взрывозащищённые асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация, ремонт / В.В. Каика, Т.В. Швецова, А.И. Аликанов и др.; под общ. ред. В.В. Каики. – Донецк: Юго-Восток, 2010. – 360 с.
7. Корпуса взрывозащищённые. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://exd.ru/pdf/catalog_37/goreltex_37_2022_a11.pdf?ysclid=ljpmi2a3ud351596540. – Загл. с экрана.
8. Светличный П.Л. Выбор и эксплуатация электрооборудования участка шахты: справочник / П.Л. Светличный. – М.: Недра, 1980. – 343 с.
9. Проектирование электрич. машин: учеб. пос. / Д.В. Цыпленков, Ю.В. Куваев, А.Б. Иванов, И.А. Кириллов; под общ. ред. Ф.П. Шкрабца. – Днепропетровск, НГУ, 2008. – 325 с.
10. Контактёр однофазный вакуумный серии SPVC. Техническое описание: Контактёр серии SPVC, завод «Таврида», Севастополь: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.masters.donntu.org/2008/fema/taraskenko/library/5.htm> – Загл. с экрана.
11. Модуль диодный МДД-80-12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asenergi.ru/catalog/modul-silovye/modul-mdd/mdd-80-12.html>. – Загл. с экрана.
12. Выключатели автоматические серии А3700 Ф, Б, БР Техническое описание, 16 с. – Режим доступа: <http://www.ktp.ru/cat/cat/00001.pdf>. – Загл. с экрана.

K.N. Marenich /Doct. Sci. (Eng.), A.I. Denisova
Donetsk National Technical University (Donetsk)

AN ELECTRICALLY SAFE MINE ASYNCHRONOUS MOTOR. JUSTIFICATION OF THE CONCEPTUAL SOLUTION

Background. *The danger of human electric shock during the operation of industrial electrical installations is caused, in particular, by the presence of reverse EMF asynchronous motors after the power supply voltage is turned off, which determines the relevance of finding technical solutions in the field of adaptation of reverse EMF suppression means directly into the structure of an asynchronous motor.*

Materials and/or methods. *The variants of the conceptual solution schemes are investigated on the physical model of the power supply system of the technological section containing an asynchronous motor, the conductivity to the ground of cable insulation and the resistance of current leakage to the ground.*

Results. *The analysis of the waveforms shows that the effect of instantaneous separation of the reverse EMF of the asynchronous motor from the power connection of the power supply cable can be achieved by synchronously opening the "star" connection of the phase windings of the stator.. This makes it possible to solve the problem of creating an electrically safe asynchronous motor (including mine design) on the basis of adapting into its structure a compact device for detecting an emergency (dangerous) state of the power supply cable and switching the "star" circuit of the stator windings.*

In this case, it is acceptable to use a two-pole circuit breaker as a switching device, which is confirmed by the presence of serial compact devices of this type and is consistent with operational requirements:

– continuous maintenance of the closed state of the contacts of the switching device without additional control actions (normal operation of the engine);

– disconnection of the contacts of the switching device by a short-term effect on its independent disconnecter of the actuation of the functional node for detecting an emergency (dangerous) condition in the motor power cable.

The use of diodes according to the scheme in the switching circuit of the phase windings of the stator allows them to create DC circuits in the process of motor shutdown, however, this is accompanied by the formation of short-term current pulses in the current leakage circuit to the ground after disconnecting the switching contacts of these stator windings.

The use of a single-pole switching device with a diode circuit for the formation of a unipolar current in one stator winding of an asynchronous motor does not allow to achieve the effect of suppressing the reverse EMF of the motor and braking its rotor, which is confirmed by oscillograms.

Conclusion. *Issues related to the problem of suppressing the electrodamaging factor caused by the action of the back EMF of an asynchronous motor after turning off the supply voltage are considered. A conceptual solution is proposed in the context of retrofitting an asynchronous motor with a device for monitoring the insulation condition in the power connection of the power supply cable and a compact device for disconnecting the star circuit of the stator windings during protective shutdown. A comparative analysis of the effectiveness of variants of schemes for implementing the protective function is presented.*

Keywords: *asynchronous motor, reverse EMF, electro-damaging factor, switching of stator windings, circuit variants, research.*

Сведения об авторах

К.Н. Маренич

SPIN-код: 8632-8425
ORCID iD: 0000-0002-6309-4986
Телефон: +7 (949) 301-98-61
Эл. почта: marenich_1958@mail.ru

А.И. Денисова

Телефон: +7 (950) 037-25-81
Эл. почта: denisova_anastasi@mail.ru

*Статья поступила 15.09.2022 г.
© К.Н. Маренич, А.И. Денисова, 2022
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалёв*

А.Я. Бабанин /д.т.н./, А.В. Чухаркин

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (Макеевка)

Т.А. Кикош

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КЛАПАНОВ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ УМЗ-4216 В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ В ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ ГОРОДСКИХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

На основании экспериментальных данных проанализировано изменение геометрических и прочностных параметров сопряжения «клапан – седло – направляющая втулка» автомобильного двигателя УМЗ-4216, выработавшего ресурс на КПП в тяжелых условиях городских пассажирских перевозок. Проведено сравнение величин износа и изменения твердости впускных и выпускных клапанов, а также сравнение с параметрами твердости импортного комплекта ремонтных клапанов.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, износ деталей газораспределительного механизма, технологический узел «клапан – седло – направляющая втулка», сопряженные поверхности, твердость поверхностного слоя.

Постановка проблемы

В настоящее время в пассажирском транспорте широко применяются автобусы малого класса 2-й категории (микроавтобусы) марки ГАЗ-3221 «ГАЗель» и различных ее модификаций, «Рута» моделей 17, 20, 25 Часовоярского ремонтного завода, БАЗ-22155 «Дельфин» Бориспольского и Черниговского автозаводов и т.д. Эксплуатация пассажирского транспорта – это сложный технологический процесс, одним из основных задач которого является поддержание автомобилей в рабочем состоянии с минимальными затратами на ремонт. Известно, что основным агрегатом автомобиля является двигатель внутреннего сгорания (ДВС), эксплуатация и ремонт которого занимает основную часть всех материальных и финансовых ресурсов.

В последнее время одним из широко применяемых видов топлива для пассажирского транспорта является компримированный природный газ (КПГ), системы питания которым устанавливаются, как правило, на бензиновые двигатели. Особенностью применения КПГ является более низкая по сравнению с бензином скорость его сгорания, следствием чего является более высокая температура отработавших газов и, соответственно, более высокая средняя температура рабочего цикла. В результате этого ухудшаются и без того сложные условия работы клапанов (особенно выпускного).

Поэтому изучение изменения технологических параметров клапанов газо-

распределительного механизма двигателя УМЗ-4216 в процессе его эксплуатации в тяжелых условиях городских пассажирских перевозок является актуальной задачей [1...6].

Анализ последних исследований и публикаций

Эксплуатационный характер работы автомобильного двигателя марки УМЗ-4216 производства Ульяновского моторного завода, широко применяемого на микроавтобусах в городском цикле пассажирских перевозок, определяется комплексом нагрузочных, скоростных и тепловых параметров его работы, формируемых режимами разгона, движения с постоянной скоростью, торможения и холостого хода. Особое значение при этом имеет вид применяемого топлива: бензин или компримированный природный газ [7].

До 97 % в условиях городского движения, 90...95 % при движении по грунтовым дорогам и 30...35 % времени движения на автомагистралях приходится на неустановившийся режим работы. Работа узла «клапан – седло – направляющая втулка» при постоянно изменяющихся скоростных и нагрузочных режимах эксплуатации усложняет возможность корректной оценки его нагруженности. При этом достоверный учет влияния неустановившихся режимов затруднен, поскольку показатели двигателя зависят не только от скоростного режима и нагрузки, но и интенсивности их изменения. Взрывной рост интенсивности дорожного движения в последние два

десятилетия привел к увеличению доли стохастических режимов работы транспортных средств.

Следствием таких эксплуатационных режимов является непрерывное изменение выходных параметров (крутящий момент и частота вращения) двигателя, вызывающее увеличение износа сопряженных поверхностей и, как результат, снижение ресурса агрегата.

Большое влияние на работоспособность и долговечность узла оказывает и вид используемого топлива. Более высокая теплота сгорания (50016 кДж/кг против 43300...44000 кДж/кг для бензина) и меньшая скорость горения приводят к тому, что температурный режим газовых двигателей (до 900 °С) оказывается выше, чем бензиновых, что снижает их ресурс [8].

На основании выполненных исследований [9,10] установлено, что существенное влияние на снижение ресурса ДВС при его эксплуатации на КПП, особенно в тяжелых условиях городских пассажирских перевозок, оказывает работа технологического узла «клапан – седло – направляющая втулка».

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является исследование изменения технологических параметров клапанов газораспределительного механизма бензинового двигателя УМЗ-4216 в процессе его эксплуатации на КПП в тяжелых условиях городских пассажирских перевозок.

Основной материал исследования

Для проведения данных исследований была отобрана и разобрана головка блока цилиндров (ГБЦ) двигателя УМЗ-4216, выработавшего свой ресурс в городском режиме работы.

Основные характеристики ДВС УМЗ-4216 [11,12]:

- Рабочий объем – 2890 см³;
- Количество цилиндров – 4;
- Порядок работы цилиндров – 1-2-4-3;

- Степень сжатия – 9,2;
- Количество клапанов – 8, OHV;
- Диаметр цилиндра – 100 мм;
- Ход поршня – 92 мм;
- Мощность – 123л.с. (90,5 кВт) при 4000 об/мин;
- Крутящий момент – 235 Н м при 2200...2500 об/мин.

Двигатель 4216 является дальнейшим развитием карбюраторного ДВС УМЗ-421, появившегося в 1993 г., и отличается от него комплексной микропроцессорной системой управления впрыском топлива и зажиганием, имеющей обратные связи по датчикам кислорода и детонации.

На изъятых клапанах выполнены замеры геометрических размеров и определение твердости поверхностного слоя.

Измерения геометрических размеров впускных и выпускных клапанов проводили микрометром модели MATRIX 317505с диапазоном измерений 25...50 мм и погрешностью 4мкм. Внутренний диаметр направляющих втулок измерялся нутромером индикаторным НИ-450.

Определение твердости поверхностного слоя клапана по различным позициям (рис. 1) проводили методом неразрушающего контроля.

Для определения твердости применяли твердомер портативный комбинированный МЕТ-УД, изготовленный в соответствии с ТУ 4271-004-18606393-04. Сертификат об утверждении типа средств измерений № 11911 зарегистрирован в Государственном реестре СИ под № 22737-02 и допущен к применению в Российской Федерации. Общий вид твердомера представлен на рис.2.

Твердомер предназначен для измерения твердости металлов и сплавов по всем стандартизованным в РФ шкалам твердости – Роквелла (HRC), Бринелля (HB), Виккерса (HV) и Шора (HSD), и позволяет проводить измерение твердости поверхностного слоя металла, подвергнутого наплавке, напылению, механической, термической или другим видам поверхностной обработки

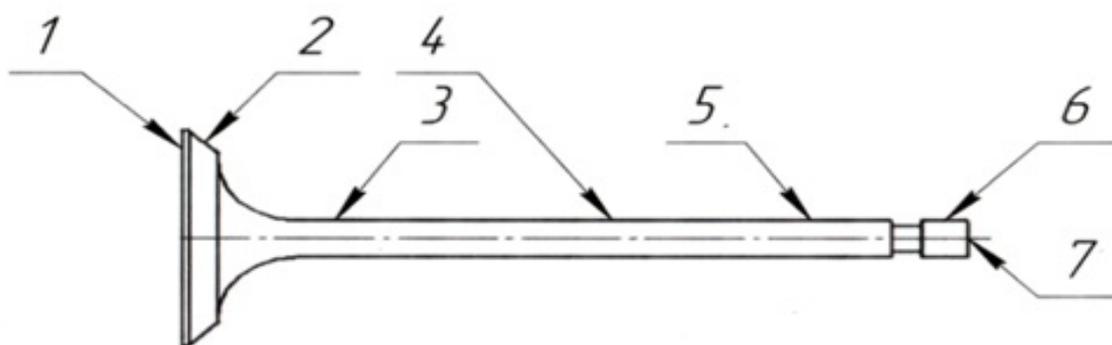


Рис. 1. Позиции измерения твердости поверхностного слоя отработавших клапанов ГРМ



Рис. 2. Общий вид твердомера МЕТ-УД

металла (так как не продавливает поверхностный слой), проводить экспресс-анализ твёрдости изделия непосредственно на месте эксплуатации или изготовления изделия. Технические возможности прибора по шкале твердости Роквелла:

- диапазон измерений –20...67 HRC;
- погрешность – не более ±1,5 HR.

При замерах применяли датчик ультразвукового принципа действия (метод ультразвукового контактного импеданса UCI), который представляет собой отдельно выполненное устройство, связанное с электронным блоком при помощи кабеля (рис. 3).

Измерение твёрдости поверхностного слоя металла впускного и выпускного клапанов проводили ультразвуковым датчиком, так как клапаны ГРМ имеют небольшую массу и толщину металла, в следующей последовательности:

1. Датчик устанавливается перпендикулярно поверхности измерения. Мигание символа «датчик» на дисплее означает готовность твердомера к проведению измерения.

2. Датчик устанавливается нижней плоскостью насадки к поверхности измерения контролируемого изделия, насадка двумя пальцами одной руки прижимается к поверхности измерения и удерживается неподвижной в процессе измерения.

3. В другой руке находится корпус датчика, чтобы лёгким усилием нажать на корпус датчика до первого сопротивления (алмазная пирамида стержня упирается в поверхность).

4. Увеличением усилия до второго сопротивления (упора) алмазная пирамида внедряется в

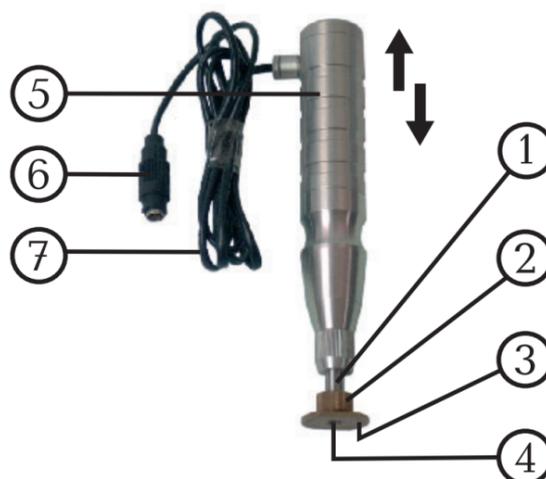


Рис. 3. Устройство ультразвукового датчика У1:
 1 – втулка; 2 – прижимное кольцо насадки;
 3 – нижняя плоскость насадки; 4 – торец втулки;
 5 – корпус датчика; 6 – штекер разъёма датчика;
 7 – соединительный кабель

поверхность. Усилие (не менее 14,7 Н) прикладывается плавно, без рывков, корпус датчика не должен колебаться.

5. Удерживается постоянное усилие на корпус датчика в течение 3...4 с, пока символ «датчик» на дисплее перестанет мигать. После звукового сигнала и появления значения твёрдости на дисплее электронного блока усилие на корпус датчика снимается.

Символ «датчик» на дисплее возвращается в мигающий режим, а корпус датчика под действием пружины возвращается в первоначальное положение. Первое измерение закончено, твердомер готов к следующему измерению.

Измерение производится на чистом, сухом, закреплённом неподвижно клапане. Клапаны двигателя 4216 изготавливаются из жаропрочных сталей, в частности, впускной – из хромокремнистой 40X9C2, выпускной – из хромоникель-марганцовистой 40X10C2М с азотированием и с наплавкой на рабочую фаску специального кольца из жаропрочного хромоникелевого сплава ЭП616А. Диаметр стержня клапанов – 9 мм. Тарелка впускного клапана имеет диаметр 47 мм, а выпускного – 39 мм. Угол рабочей фаски обоих клапанов – 45 градусов.

Клапаны работают в металлокерамических направляющих втулках. Втулки изготовлены прессованием с последующим спеканием из смеси железного, медного и графитового порошков с добавлением для повышения износостойкости дисульфида молибдена.

Измерения твердости проводили на впускных и выпускных клапанах ГРМ выработавшего свой ресурс двигателя. Было произведено измерение твердости поверхностного слоя в семи позициях

Табл. 1. Результаты замеров геометрических размеров направляющей втулки и стержня клапана в области их контакта

№ цилиндра	Диаметр рабочей части стержня под втулкой, мм	Внутренний диаметр изношенных направляющих втулок, мм	Зазор между втулкой и стержнем, мм
Впускные клапаны			
1	8,92	Н.св.	Н.св.
2	8,93	9,01	0,08
3	8,92	9,09	0,17
4	8,93	9,10	0,17
Выпускные клапаны			
1	8,90	9,09	0,19
2	8,89	9,11	0,22
3	8,90	9,23	0,24
4	8,90	9,22	0,32

Табл. 2. Твердость поверхностного слоя отработанных клапанов двигателя УМЗ-4216

№ п/п	№ цилиндра	Твердость поверхностного слоя по позиции, HRC (ед)			
		Рабочая фаска (поз. 2)	Стержень клапана под направляющей втулкой		
			Низ (поз. 3)	Верх (поз. 4)	Ср. знач. (поз. 3 и 4)
Впускной клапан					
1	1	32,1	26,8	28,1	27,45
2	2	32,7	24,4	30,9	27,65
3	3	32,2	29,4	28,6	29,0
4	4	33,4	26,6	30,1	28,35
5	Ср. знач.	32,6	26,8	29,4	28,11
Выпускной клапан					
1	1	35,57	29,2	29,6	29,4
2	2	32,78	30,6	35,3	32,95
3	3	32,2	32,3	32,8	32,55
4	4	35,5	28,7	31,3	29,4
5	Ср. знач.	33,98	30,2	32,25	31,58

(рис.1), а в каждой позиции выполнено не менее шести измерений по которым, для увеличения точности, было определено среднее значение измеряемой твердости.

В результате дефектоскопии клапанов разобранной ГБЦ методом визуального осмотра выявлены следующие дефекты:

- большой люфт клапанов в направляющих втулках;
- повреждение рабочих фасок клапанов, имеются раковины и сколы, что снижает компрессию в камере сгорания.

Результаты выполненных замеров геометрических размеров направляющих втулок и стержня выпускного и впускного клапана в области их контакта представлены в табл. 1.

Результаты замера свидетельствуют, что зазоры между втулкой и стержнем выпускных клапанов значительно меньше, чем впускных клапанов, и находятся в диапазоне 0,08...0,17 мм и 0,19...0,32 мм соответственно. По заводским данным, зазор в сопряжении нового двигателя

должен быть в пределах 0,028...0,097 мм для впускных и 0,053...0,117мм для выпускных клапанов.

Увеличенный зазор в сопряжении способствует отклонению клапана от направления вертикального хода, что приводит:

- к неплотному прилеганию фаски клапана (*b*) к седлу (рис. 4);
- несимметричному износу фаски седла под действием ударной деформации работающего клапана;
- потере герметичности цилиндра и, следовательно, снижению мощности двигателя.

Из этого следует, что при ремонте целесообразна замена направляющих втулок либо установка в них дополнительных вставок.

Результаты определения твердости поверхностного слоя отработанных клапанов двигателя УМЗ-4216 на рабочей фаске и стержне клапана представлены в табл. 2.

Из представленных данных следует, что впускные клапаны имеют более низкую величину

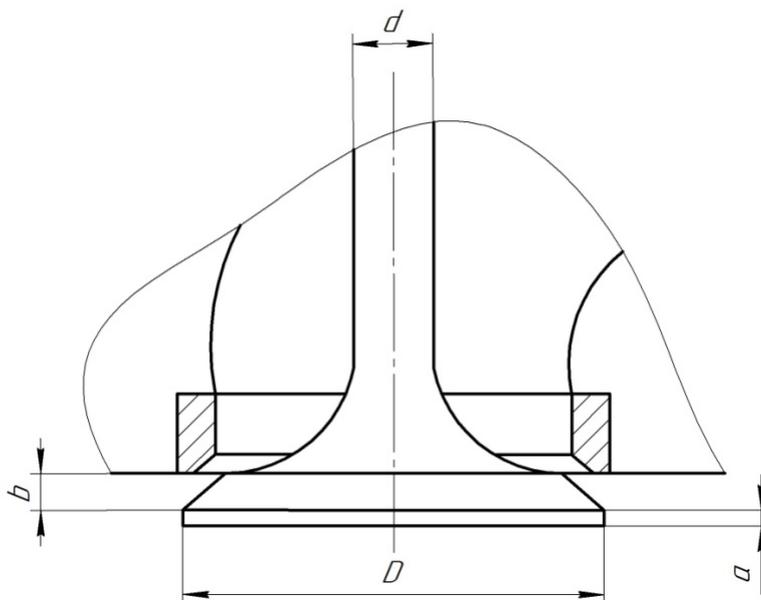


Рис. 4. Схематическое изображение сопряжения «клапан – седло»:
 D – диаметр тарелки клапана; a – ширина цилиндрического пояса; b – ширина рабочей фаски;
 d – диаметр стержня клапана

твердости как на рабочей фаске, так и на стержне клапана. Среднее снижение составляет на 1,38 и 3,23 HRC ед. соответственно на рабочей фаске и стержне клапана.

Для сравнения были выполнены аналогичные замеры твердости ремонтных клапанов производства фирмы SM(SchoettleMotorenteile) GmbH (Германия). Установлено, что фаска и стержень впускного и выпускного клапана имеют твердость соответственно 31,4 и 38,6; 27,8 и 38,8 HRC ед. Среднее снижение составляет на 7,2 и 11,0 HRC ед., соответственно на рабочей фаске и стержне клапана.

Представленные результаты свидетельствуют, что ремонтные клапаны, выпускаемые фирмой SMGmbH, имеют более высокую твердость в сравнении с отработанными клапанами, увеличение которой на рабочей фаске и стержне составляет порядка 5...6 ед.

Выводы

Результаты замера свидетельствуют, что зазоры между втулкой и стержнем выпускных клапанов значительно меньше, чем впускных клапанов, и находятся, соответственно, в диапазоне 0,08...0,17 мм и 0,19...0,32 мм.

Из представленных данных следует, что впускные клапаны имеют более низкую величину твердости как на рабочей фаске, так и на стержне клапана.

Среднее снижение твердости впускных клапанов наблюдается на величину 1,38 и 3,23 HRC ед. соответственно на поверхности рабочей фаски и стержня клапана.

Установлено, что фаска и стержень впускного и выпускного ремонтного клапана фирмы SMGmbH (Германия) имеют твердость соответственно 31,4 и 38,6; 27,8 и 38,8 HRC ед. Среднее снижение составляет на 7,2 и 11,0 HRC ед., соответственно на рабочей фаске и стержне клапана. Ремонтные клапаны фирмы SMGmbH имеют более высокую твердость в сравнении с отработанными клапанами, увеличение которой на рабочей фаске и стержне составляет порядка 5...6 ед.

Основными направлениями повышения срока работы данного технологического узла являются придание рабочим кромкам и стержням более высокой твердости и снижение износа сопряженных поверхностей «стержень клапана – направляющая втулка» для исключения перекоса движения клапана в вертикальном направлении.

Целесообразно проведение дальнейших исследований по определению механизма снижения срока службы газораспределительного механизма при работе ДВС на КПГ.

Список литературы

1. Cavalieri, Federico J. Determination of wear in internal combustion engine valves using the finite element method and experimental tests / Federico J. Cavalieri, Fernando Zenklusen, Alberto Cardona // Mechanism and Machine Theory. – 2016. – Vol.104. – P. 81-99.
2. Londhe, Rohit T. Experimental Analysis of Valve and Valve Seats Wear in Gases (CNG) Fuelled Engine / Rohit T. Londhe, J.M. Kshirsagar //IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2014. –№11.– P. 56-62.

3. Forsberg, P. Combustion Valve Wear: A Tribological Study of Combustion Valve Sealing Interfaces. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology / P. Forsberg. – ActaUniversitatisUpsaliensis.– 2013. – 57 p.
4. Василихин, А.В. Основные причины износа клапана двигателя / А.В. Василихин // Сборник работ выпускников факультета механизации сельского хозяйства: сборник научных статей, Ставрополь, 01–30 сентября 2018 г. – Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2018. – С. 47-51.
5. Казаков, С.С. Особенности износа стержней выпускных клапанов дизельного двигателя СМД / С.С. Казаков, С.И. Никитин, А.В. Федосеев // Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы: Материалы и доклады II Всероссийской научно-практической конференции, Княгинино, 23 марта 2017 года. – Княгинино: Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2017. – С. 70-73.
6. Веремей, Г.А. Практические методы оценки износа седел клапанов в процессе дефектации / Г.А. Веремей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – №1(47). – С. 71-76.
7. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов – 4-изд. стер. – М.: Высш. шк. – 2008. – 496 с.
8. Паничкин, А.В. Оценка ресурса двигателя автобусов, работающих на газовом топливе, эксплуатируемых в режиме городских перевозок пассажиров [Текст] / А.В. Паничкин, Н.В. Голубенко // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – №3(50). – С. 123-129.
9. Бабанин, А.Я. Анализ работы деталей технологического узла «клапан – седло – направляющая втулка» газораспределительного механизма ДВС / А.Я. Бабанин, А.В. Чухаркин // Промышленность и сельское хозяйство. – 2020. – №12(29). – С. 21-26.
10. Бабанин, А.Я. Влияние вида топлива на надежность работы технологического узла «клапан – седло – направляющая втулка» газораспределительного механизма ДВС / А.Я. Бабанин, А.В. Чухаркин // Научно-практический журнал «Строитель Донбасса». – 2021. – №1(14). – С. 10-15.
11. УМЗ-4213, УМЗ-4216: Устройство. Ремонт. Техническое обслуживание. – Ульяновск: ОАО «УМЗ», Автоальфа, 2008. – 66 с.
12. Двигатель 4216 и его исполнения: Руководство по эксплуатации 4216.3902010 РЭ. – Ульяновск: ОАО «УМЗ», 2007. – 45 с.

A.Y. Babanin /Dr. Sci. (Eng.), A.V. Chukharkin

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (Makiivka)

T.A. Kikosh

Donetsk National Technical University (Donetsk)

ANALYSIS OF CHANGES IN THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE VALVES OF THE GAS DISTRIBUTION MECHANISM OF THE UMZ-4216 ENGINE IN THE PROCESS OF ITS OPERATION IN DIFFICULT CONDITIONS OF URBAN PASSENGER TRANSPORTATION

Background. *The operation of internal combustion engines on vehicles operating in modern urban traffic is characterized by unsteady operating modes. The consequence of this is a continuous change in the output parameters (torque and speed), causing an increase in wear of the mating surfaces and, as a result, a decrease in the resource of the unit. Up to 97% of the time of car operation in urban driving conditions, up to 90 ... 95% of the time when driving on dirt roads and up to 30 ... 35% of the time when driving on highways fall precisely on the unsteady mode of operation.*

Materials and/or methods. *On the basis of experimental data, the change in the geometric and strength parameters of the “valve – seat – guide sleeve” interface of the UMZ-4216 automobile engine, which has exhausted its resource on compressed natural gas, has been analyzed.*

Results. *The measurement results show that the gaps between the bushing and the stem of the exhaust valves are much smaller than those of the intake valves, and the intake valves have a lower hardness value both on the working chamfer and on the valve stem.*

Conclusion. *The main directions for increasing the service life of this technological unit are giving the working edges and rods a higher hardness and reducing the wear of the mating surfaces “valve stem - guide bushing” to prevent skew of the valve movement in the vertical direction.*

Keywords: *internal combustion engine, wear of parts of the gas distribution mechanism, technological unit “valve - seat - guide sleeve”, mating surfaces, hardness of the surface layer.*

Сведения об авторах

А.Я. Бабанин

Телефон: +7 (949) 358-59-50

Эл. почта: bay2912@mail.ru

А.В. Чухаркин

SPIN-код: 8259-9944

Телефон: +7 (949) 331-78-60

Эл. почта: a.v.chukharkin@donnasa.ru

Т.А. Кикош

SPIN-код: 3673-5095

Телефон: +7 (949) 377-47-27

Эл. почта: kikoshtaras@mail.ru

Статья поступила 01.09.2022 г.

© А.Я. Бабанин, А.В. Чухаркин, Т.А. Кикош, 2022

Рецензент д.т.н., проф. А.П.Кононенко

Е.В. Ошовская /к.т.н./, В.А. Сидоров /д.т.н./, Д.О. Прудченко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ МОСТОВОГО КРАНА

В работе рассматривались упруго-демпфирующие свойства металлоконструкций литейного мостового крана при затухании колебаний после силового воздействия как диагностический признак работоспособного состояния данного элемента. Приведены результаты математического моделирования, лабораторных и экспериментов на модели.

Ключевые слова: литейный кран, металлоконструкции, демпфирование.

Металлоконструкции являются основным элементом мостового крана, выполняя роль подвижного основания. Воспринимая силовые нагрузки, в элементах металлоконструкции кранов возникают упругие, затухающие колебания, количество которых определяет число циклов усталостных нагружений и возможность зарождения трещин. Обеспечение безопасности кранов производится в соответствии с нормативными документами [1,2] – применительно к приводам и системам управления выполняется дублирование, для стальных канатов и ходовых колёс применима периодическая замена. Наиболее ответственной частью крана, которая не подлежит дублированию или замене, является металлическая конструкция. Её разрушение приводит к авариям и материальному ущербу.

Причиной аварий и разрушений металлоконструкций мостовых кранов являются дефекты в её элементах. Приблизительно 90 % всех случаев разрушения металлоконструкций вызвано разрушением сварных соединений. Около трети аварий мостовых кранов происходят из-за усталостных повреждений несущих элементов металлоконструкций. Динамические нагрузки, возникающие в металлоконструкциях в мостовых кранах при передвижении ходовых колёс, рассматривались в работах [3...6]. Недоступность мест зарождения трещин в главных балках мостового крана для методов неразрушающего контроля требует разработки индикаторного метода диагностирования металлоконструкций. Способность демпфирования (поглощения) возникающих колебаний в упругой области определяет уровень безотказности крана в целом.

Это определяет актуальность исследования упруго-демпфирующих свойств, металлоконструкций литейных кранов как метода раннего диагностирования.

Возникновение колебаний при подъёме груза с веса и с подхвата изучено достаточно глубоко в работах Руденко Н.Ф., Казака С.А., Иванченко Ф.К. и др. [7...9] и объясняется наличием упругого элемента – канатов полиспасти. Использование расчётных моделей двух и трёхмассовых упругих систем позволяет определить частоту собственных колебаний, коэффициент динамичности и др. В тоже время в данных работах отсутствуют данные о степени демпфирования колебаний. Существующие справочные данные [10], в настоящее время требуют уточнения и разработки методики определения упруго-демпфирующих параметров конкретных механизмов. Целью работы является разработка подходов к оценке степени затухания колебаний, как диагностического параметра работоспособности металлоконструкций мостового крана. Достижение цели определяется проведением ряда математических, лабораторных и экспериментов на модели литейного крана. Выполнение измерений параметров колебаний на действующем оборудовании представляет одно из направлений дальнейших исследований.

При работе литейного крана колебания возникают при каждом цикле подъёма и опускания груза, наиболее интенсивные колебания появляются при разгрузке лотка или бады (рис. 1). Металлоконструкции испытывают действие циклических нагрузок, приводящих к появлению усталостных трещин, в местах соединения главных и торцевых балок, в шарнирах балансиров и др. Безотказность применения литейных кранов грузоподъёмностью 110...450 т, лимитируется состоянием металлоконструкций, являющихся невосстанавливаемым элементом.

В процессе работы мостовых кранов в их элементах возникают колебания, вызывающие динамические нагрузки. В качестве основных упруго-



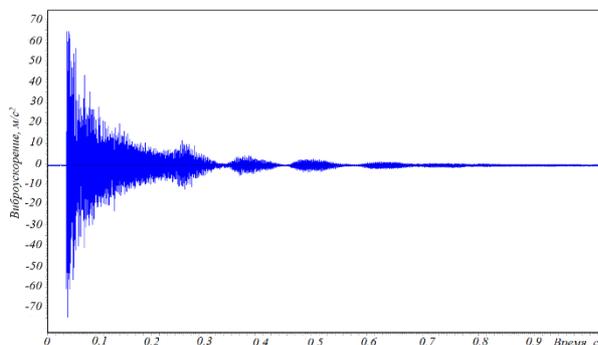
Рис. 1. Бадья перед загрузкой (а) и над электродуговой печью (б), завалка металлолома в конвертер (в)

демпфирующих параметров элементов конструкций, влияющих на характер колебаний и величину нагрузок выступают коэффициент жёсткости и коэффициент демпфирования.

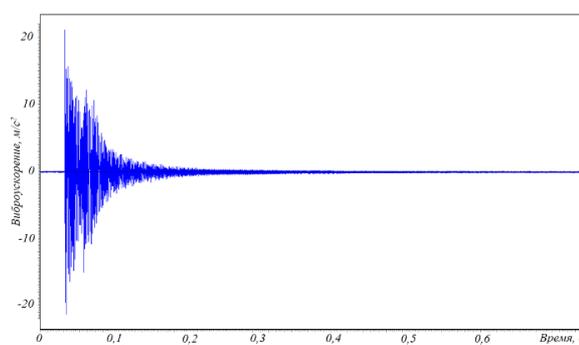
Предварительные исследования. Известным фактом является утверждение о том, что сталь – это весьма податливый материал и целостность стальных деталей оценивается по тональности звука после удара и времени затухания. Чистый высокий звук свидетельствует об отсутствии трещин и посторонних включений, а длительность

звука характеризует плотность материала и низкое сопротивление звуковым колебаниям. Это подтверждается проведенным экспериментом, получены временные диаграммы затухания (рис. 2):

- 1) стальное кольцо №1 – диаметры: внешний – 540 мм, внутренний – 515 мм; ширина – 48 мм, длительность звучания более 1,0 с;
- 2) стальное кольца №2 – диаметры: внешний – 280 мм, внутренний – 236 мм; ширина – 95 мм, длительность звучания около 0,2 секунды;
- 3) стальные кольца и детали с трещиной.



а)



б)

Рис. 2. Временные диаграммы затухания значений виброускорения для: стального кольца №1 (а), стального кольца №2 (б)

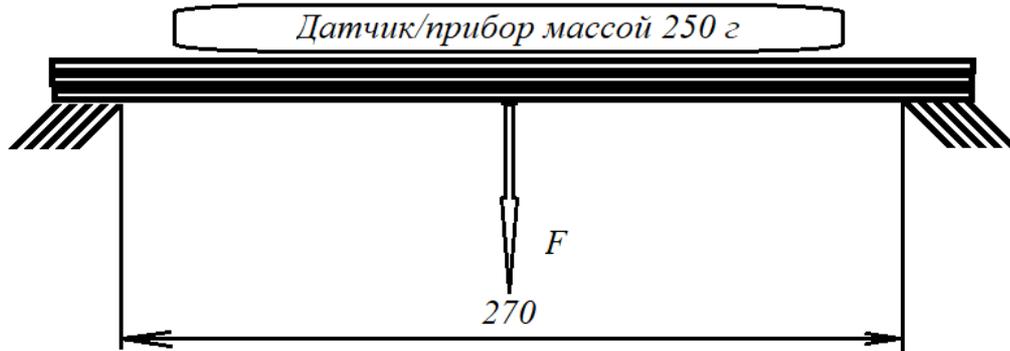


Рис. 3. Схема лабораторного стенда

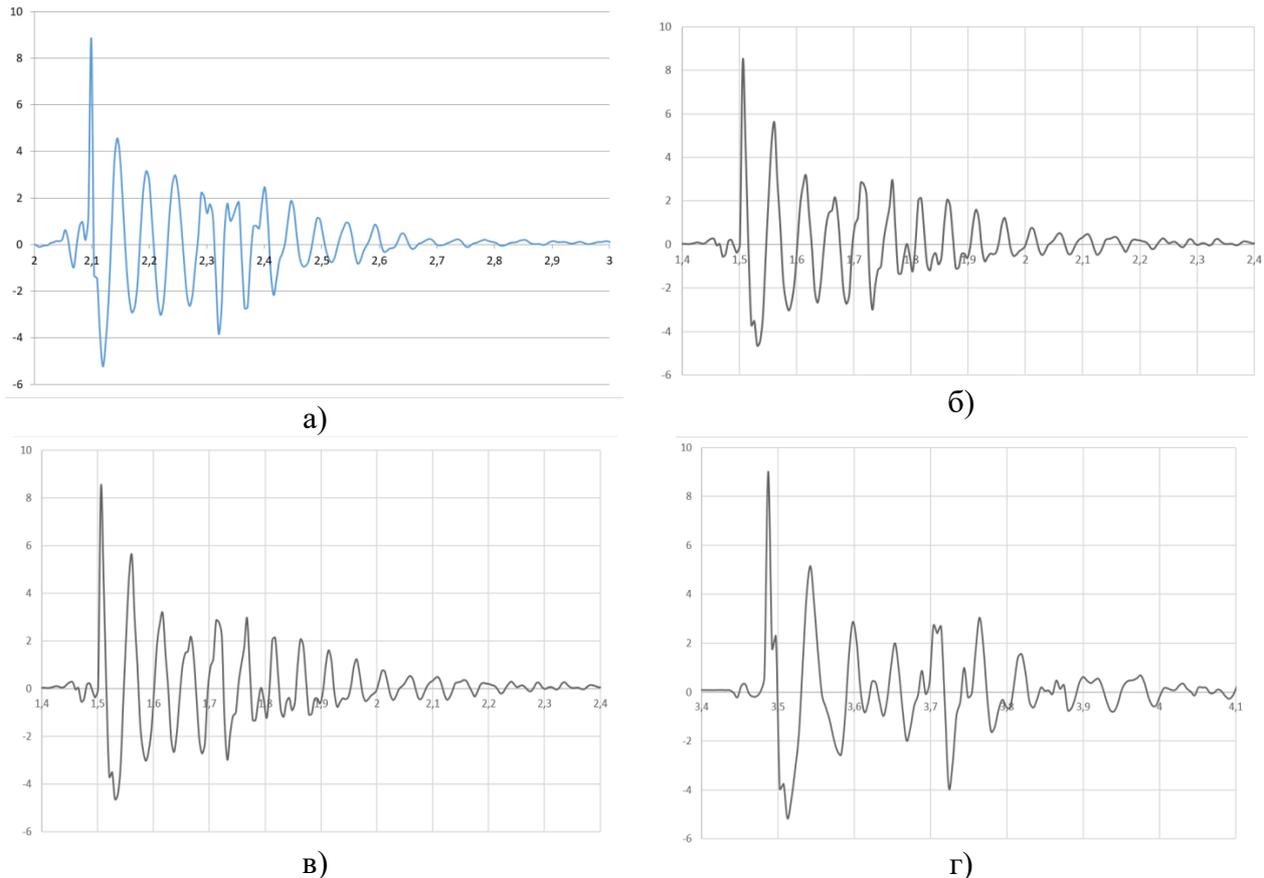


Рис. 4. Результаты лабораторного эксперимента:

- а) затухающие колебания пяти целых пластин; б) затухающие колебания четырёх целых пластин;
- в) затухающие колебания трёх целых пластин; г) затухающие колебания при наличии трещины

Кольца с трещиной практически не имели времени затухания, отличались глухим звуком. Поглощение колебаний трещиной известная причина глухого звука.

Лабораторный эксперимент проводился для определения влияния момента инерции сечения и наличия трещины на возникающие колебания при резком снятии нагрузки – 2 Н. Лабораторный стенд (рис. 3) представлял собой жестко зашпеченные пластины (сечение 25,8×0,74 мм) с расстоянием между опорами 270 мм. Количество пластин менялось – 5, 4, 3. При экспериментах с 3-мя пластинами средняя имела трещину.

Измерения проводились при помощи программы *Accelerometer Meter*.

Результаты эксперимента показаны на рис. 4. Таким образом, доказано, что наличие трещины уменьшает время затухания, так как энергия колебаний поглощается трещиной и приводит к искажению квазигармонических затухающих колебаний генерируя кратные и случайные гармоники.

Математическая модель 1.

Расчётная схема в случае лабораторного эксперимента может быть рассмотрена как двухмассовая с бесконечной второй массой (рис. 5).

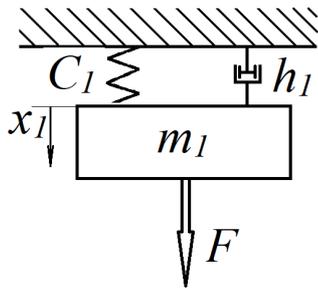


Рис. 5. Расчётная схема лабораторного эксперимента

Известно [8], что свободные колебания двух-массовой системы (рис. 5) с бесконечной массой одного из элементов описывает дифференциальное уравнение движения вида:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = F,$$

где m – масса; h – коэффициент демпфирования; c – жесткость упругого подвеса; x – перемещение.

Исходные данные:

$F=2+m_1 \times g$; $m_1=0,3$ кг; $l=0,27$ м; $b=25,8$ мм; $h=0,74$ мм; $c_1=48 \cdot E \cdot I/l^3=1100$ Н/м;

Решение (рис. 6) неоднородного уравнения состоит из двух этапов:

- 1) решение соответствующего однородного уравнения;
- 2) частное решение неоднородного уравнения.

$$x = e^{\alpha t} \times (F/c_1) \times \cos(\beta t),$$

$$\beta = (0,5 \times m_1) \times (- (h^2 - 4 \times m_1 \times c_1))^{1/2}.$$

$$\alpha = - (h/2m_1),$$

$$F = 3 + 2 \times e^{-21 \times t}.$$

Планируемый эксперимент.

Главная балка мостового крана представляет собой жёсткую прямоугольную конструкцию, усиленную рёбрами жёсткости и рельсами перемещения тележки механизма подъёма. Несмотря на это при расчёте выполняется проверка значения прогиба [11,12]. Так, например, для крана грузоподъёмностью 12,5 т, длиной пролёта 16,5 м, массой 21,5 т и сечением главной балки, допустимый прогиб составляет:

$$[f_{\max}] = \frac{L}{900} = \frac{16500}{900} = 18,333 \text{ мм.}$$

Фактический прогиб от подвижной статической нагрузки определяется для случая, когда наиболее нагруженное колесо тележки находится в середине пролёта:

– номинальные массы:

$$f_{\max} = \frac{0,5(Q + m_T)gL^3}{48EI_x} =$$

$$= \frac{0,5(12,5 + 4,5)9,8 \cdot 16,5^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 3347,6 \cdot 10^6} = 11,1$$

– массы с учетом коэффициентов перегрузки (комбинация нагрузок I.1a):

$$f_{\max} = \frac{0,5(k_Q \Psi Q + k_{GT} m_T)gL^3}{48EI_x} =$$

$$= \frac{0,5(1,5 \cdot 1,24 \cdot 12,5 + 1,1 \cdot 4,5)9,8 \cdot 16,5^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 3347,6 \cdot 10^6} =$$

$$= 18,395$$

– массы с учетом коэффициента толчков (комбинация нагрузок I.1b):

$$f_{\max} = k_T \frac{0,5(k_Q \Psi Q + k_{GT} m_T)gL^3}{48EI_x} =$$

$$= 1,0 \frac{0,5(1,5 \cdot 1,24 \cdot 15 + 1,1 \cdot 4,5)9,8 \cdot 16,5^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 3347,6 \cdot 10^6} =$$

$$= 18,395$$

Это послужило основанием для проведения планируемого эксперимента по определению коэффициентов влияния факторов (параметров главной балки) на функцию отклика (прогиб балки). Исходные данные для планируемого эксперимента приведены в табл. 1. Оценка степени влияния факторов на прогиб главной балки моста выполнена с использованием метода полного факторного эксперимента.

На основании полученных результатов вычислялись коэффициенты регрессии при факторах и их взаимодействии. Полученные значения коэффициентов регрессии приведены в табл. 2. Знак коэффициента указывает на характер влияния соответствующего фактора, а именно, при увеличении пролёта и грузоподъёмности прогиб будет расти, а увеличение геометрических параметров балки уменьшает прогиб, что соответствует физической сути данного вида деформации.

С учетом погрешностей и допусков на размеры была рассчитана остаточная дисперсия, значения критерия Стьюдента. Полученные значения представлены в виде диаграммы Парето.

Установлено, что максимальное влияние на прогиб главной балки моста оказывает пролет

Табл. 1. Факторы и их уровни варьирования

Фактор	Кодированное обозначение	Единица измерения	Уровень	
			нижний -1	верхний +1
Ширина балки В	x ₁	мм	400	1200
Высота балки Н	x ₂	мм	800	1600
Толщина стенки δ	x ₃	мм	10	20
Пролет крана L	x ₄	м	16	32
Грузоподъемность Q	x ₅	т	20	100

Табл. 2 Коэффициенты уравнения регрессии

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
-62,3	-116	-53,3	131,2	112,5
b_1b_2	b_1b_3	b_1b_4	b_1b_5	b_4b_5
46,33	19,32	-48,5	-41,5	87,5
b_2b_3	b_2b_4	b_2b_5	b_3b_4	b_3b_5
36,33	-90,3	168,7	-41,4	-35,5

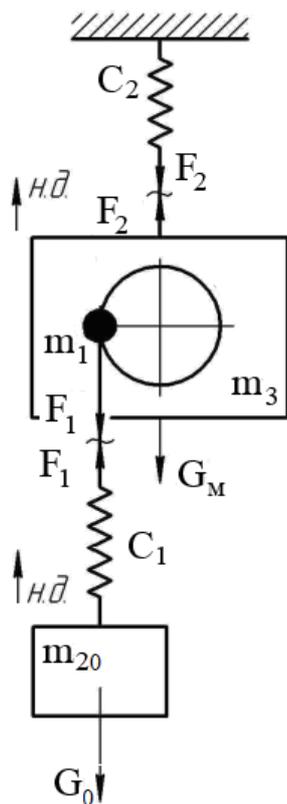


Рис. 7. Расчетная схема для модели мгновенной разгрузки

крана, высота сечения и грузоподъемность. Степень влияния ширины сечения балки и толщины стенки в 2...2,3 раза ниже. Так как высота сечения и пролет крана влияют на коэффициент жесткости, то для её повышения для конкретного крана

следует увеличивать высоту сечения главных балок.

Математический эксперимент 2.

Теоретическое исследование нагружения металлоконструкции мостового крана при внезапной разгрузке выполнено на основе трёхмассовой модели двумя упругими связями (рис. 6) [7]. Расчетная схема включает:

m_1 – приведенная масса вращающихся частей подъемного механизма;

m_2, Q – масса и вес поднимаемого груза соответственно;

m_{20}, Q_0 – масса и вес грузозахватного органа;

m_3, G – масса и вес главных балок моста, приведенных к вертикальному перемещению поднимаемого груза (в середине пролета);

C_1 – суммарная жесткость подъемных канатов;

C_2 – жесткость моста в середине пролета;

F_1 – натяжение грузонесущих ветвей каната;

F_2 – нагрузка моста крана.

Мгновенная разгрузка происходит от полного веса груза Q до веса грузозахватного органа Q_0 . Перед этим система находилась в состоянии покоя, а упругие связи были подвержены действию статической нагрузки. Поведение элементов системы после разгрузки описывается уравнениями:

$$\begin{cases} m_{20}\ddot{x}_{20} = F_1 - Q_0; \\ m_3\ddot{x}_3 = F_2 - G - F_1. \end{cases}$$

Упругие нагрузки представляют собой двух-частотные функции вида:

$$F_1 = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t + D_1 ,$$

$$F_2 = A_3 \cos \omega_1 t + A_4 \cos \omega_2 t + D_2 ,$$

где ω_1, ω_2 – круговые частоты собственных колебаний, определяемые по выражению:

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{C_1 + C_2}{m_3} + \frac{C_1}{m_{20}} \right) \mp \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{C_1 + C_2}{m_3} + \frac{C_1}{m_{20}} \right)^2 - \frac{4C_1 C_2}{m_{20} m_3}}}$$

A_1, A_2, A_3, A_4 – амплитуды, значения которых определяется по формулам:

$$A_1 = \frac{(Q - Q_0) \left(\omega_2^2 - \frac{C_1}{m_{20}} \right)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad A_2 = \frac{(Q - Q_0) \left(\frac{C_1}{m_{20}} - \omega_1^2 \right)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

$$A_3 = \frac{(Q - Q_0) \omega_2^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad A_4 = -\frac{(Q - Q_0) \omega_1^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

D_1, D_2 – конечные статические нагрузки равные:

$$D_1 = Q_0 ; \quad D_2 = G + Q_0 .$$

С учетом того, что упругие нагрузки могут быть представлены как:

$$F_1 = Q - C_1(x_{20} - x_3), \quad F_2 = Q + G - C_2 x_3 ,$$

получим выражения для вычисления перемещений грузозахватного органа и моста:

$$x_3 = \frac{Q + G - F_2}{C_2} ; \quad x_{20} = \frac{Q - F_1}{C_1} + x_3 .$$

На основании представленного математического описания выполнена программная реализация в пакете MathCad, которая использована для моделирования процесса мгновенной разгрузки крана.

Результаты моделирования и их анализ.

Моделирование выполнено для следующих исходных данных: $m_1=22500$ кг – приведенная масса вращающихся частей подъемного механизма; $m_2=2650$ кг – масса поднимаемого груза; $Q=26500$ Н – вес поднимаемого груза соответственно; $m_{20}=53$ кг – масса грузозахватного органа; $Q_0=520$ Н – масса и вес грузозахватного органа; $m_3=2151720$ кг – масса главных балок моста, приведенных к вертикальному перемещению поднимаемого груза (в середине пролета); $G=1497000$ Н – вес главных балок моста, приведенных к вертикальному перемещению поднимаемого груза (в середине пролета); $C_1=51000000$ Н/м – суммарная жесткость подъемных канатов; $C_2=46250000$ Н/м – жесткость моста в середине пролета.

Круговые частоты собственных колебаний равны $\omega_1=4,6, \omega_2=980,9$. Графики изменения нагрузки на мост F_2 и в ветвях каната F_1 показаны на рис. 8, получены зависимости перемещения моста и грузозахватного органа. Следует отметить, что нагрузки на мост в 5...7 раз выше, чем в канатах, а период колебаний – почти в 200 раз

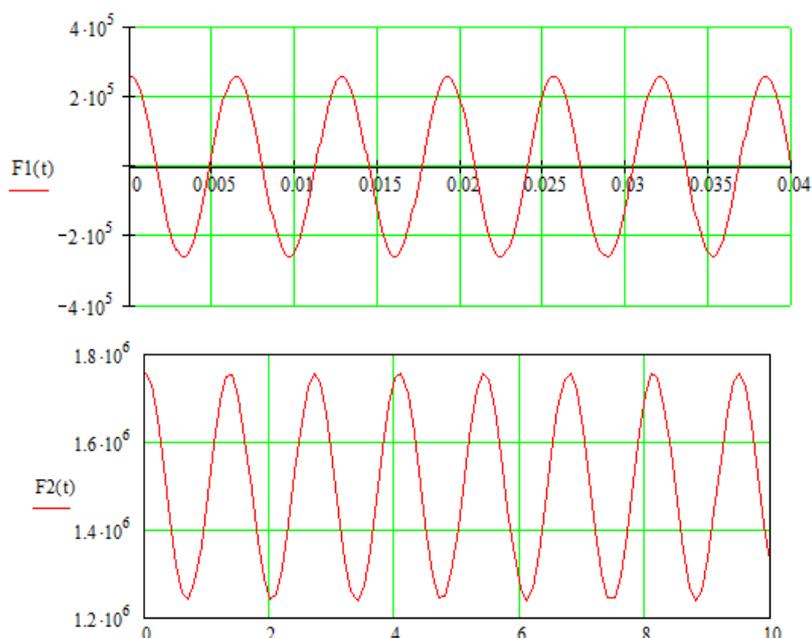


Рис. 8. Графики изменения нагрузки (Н) в ветвях каната F_1 и на мост F_2

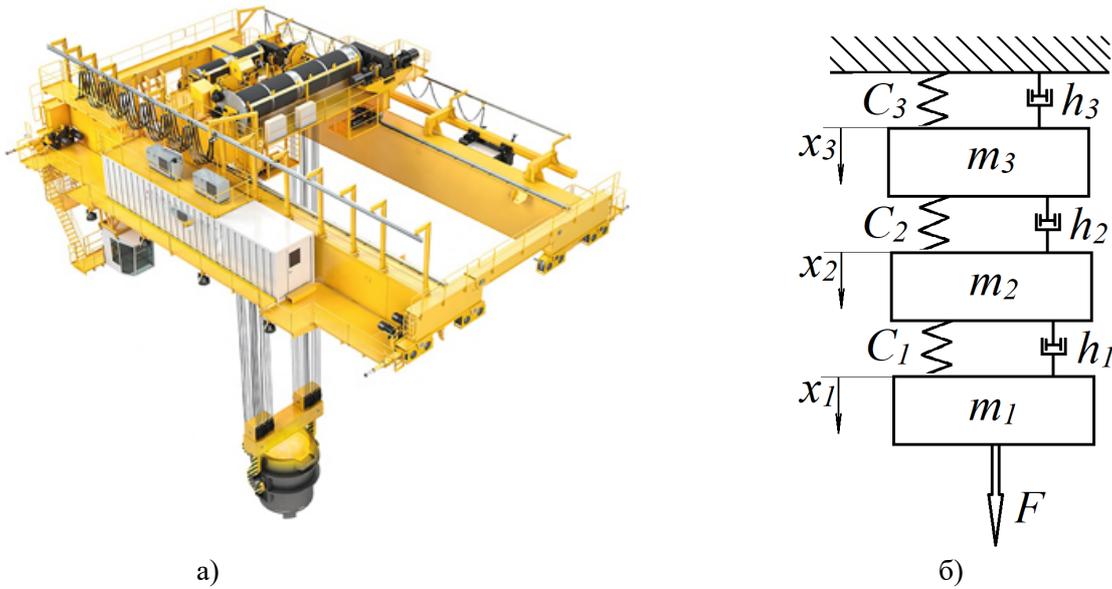


Рис. 9. Общий вид крана (а) и расчётная схема (б)

больше и составляет 1,4 с. Максимальное перемещение моста – около 11 мм.

Исследования на модели.

Общий вид крана и расчётная модель при поднятой траверсой бадье с металлоломом показаны на рис. 9. При этом предполагается следующее: m_1 – масса траверсы, бадьи и металлолома; m_2 – масса тележки механизма главного подъёма; m_3 – масса главных балок крана; c_1 – жёсткость полиспаста, меняется при изменении высоты подъёма:

$$C_n = (E_k \cdot F_k / L_k) \cdot a^2 \cdot U^2,$$

где E_k – модуль упругости каната; F_k – площадь поперечного сечения проволок каната; L_k – длина каната для данной высоты подъёма h , $L_k = h \times a \times U_n$ м; a – количество ветвей каната, навиваемых на барабан; U – кратность полиспаста; c_2 – жёсткость тележки механизма главного подъёма,

установленной на балках моста; c_3 – жёсткость главных балок моста зависит от положения тележки главного подъёма:

$$C = 48 \cdot E \cdot I \cdot (a+b) / (a \cdot b)^2;$$

где E – модуль упругости материала балки при растяжении, МПа; I – момент инерции сечения, m^4 ; a, b – координаты положения тележки; h_1, h_2, h_3 – соответствующие коэффициенты демпфирования; \ddot{x} – ускорение; \dot{x} – скорость; x – перемещение соответственно масс m_1, m_2, m_3 . Дополнительно, каждая масса обладает частотой собственных колебаний:

$$f_i = 2\pi \sqrt{\frac{c_i}{m_i}}.$$



Рис. 10. Расположение датчика и прибора при проведении измерений

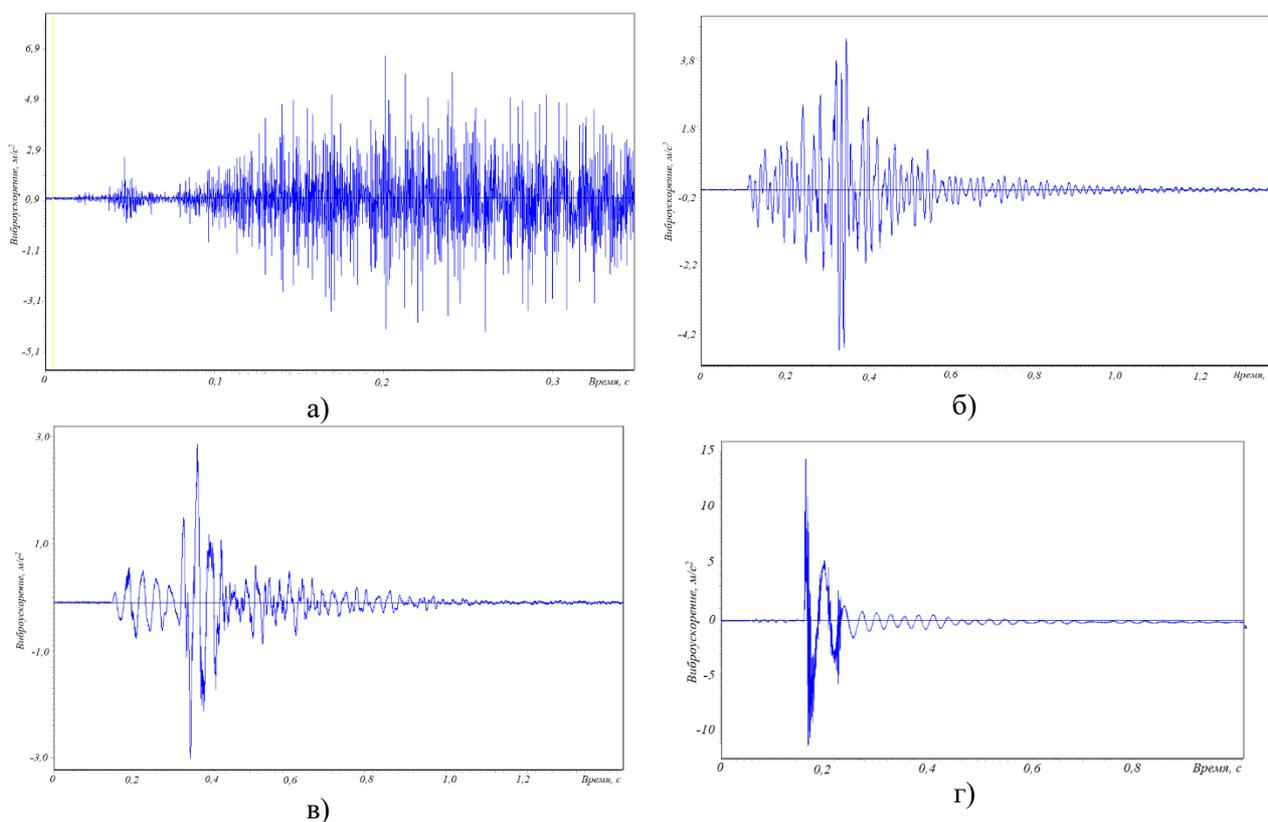


Рис. 11. Временная реализация виброускорения:

а) при подъёме с подхватом – мин $-7,98$, макс. $+9,00$, размах $-16,98$; б) при резкой разгрузке на тележке – мин $-4,69$, макс. $+4,41$, размах $-9,10$; в) при резкой разгрузке на балке моста – мин $-2,95$, макс. $+2,92$, размах $-5,87$; г) при резкой разгрузке на траверсе – мин $-4,7$, макс. $+4,54$, размах $-9,24$

Исследования были проведены на модели литейного крана грузоподъемностью 450/90/15 тонн. Это четырехбалочный литейный кран с главной и вспомогательной тележками, которые параллельно перемещаются по своим пролётным балкам моста на разных высотных уровнях (вспомогательная тележка имеет возможность проезда под главной тележкой). Масштаб модели – 1:35.

Основные характеристики крана (рис. 10): высота подъёма – 270 мм; скорость подъёма – 1,3 см/с; скорость передвижения – 1,3 см/с; длинный ход – 1800 мм. Количество ходовых колес: крана – 16 шт.; тележки – 8 шт. Способ управления – электрический. Масса крана и его основных частей – 125 кг.

Измерения параметров вибрации проводились на элементах крана при использовании анализатора вибрации 795М и пьезоэлектрического датчика С11. Крепление датчика осуществлялось при помощи магнита (рис. 10). Проведено несколько циклов измерений.

Цикл 1. Подъём с подхватом. Проведено измерение временной реализации вибрационного сигнала виброускорения на тележке главного подъёма при подъёме груза массой 1,3 кг с подхватом. Временная реализация сигнала виброускорения получена при следующих установках прибора:

единица измерения – m/s^2 ; режим интегратора – линейный; усреднения – выключены; усилитель – ручной; чувствительность датчика – $7,75$ $\mu K/m/s^2$; коэффициент усилителя – 5; режим запуска – свободный; триггер – внешний; тип окна – Хамминга; диапазон 10...4027; количество точек – 16384; период выборки – 300 мкс; длина выборки – 16.

Цикл 2. Опускание груза. Измерение временной реализации вибрационного сигнала виброускорения на тележке главного подъёма при опускании груза массой 1,3 кг. Получены значения виброускорения – мин $-5,0$, макс. $+5,15$, размах – 10,15.

Цикл 3. Резкая разгрузка (рис. 11). Проведено измерение временной реализации вибрационного сигнала виброускорения на тележке, мосте и траверсе главного подъёма при резкой разгрузке груза массой 1,7 кг.

Измерения на тележке – время воздействия – 944 мс, время затухания – 717 мс, период собственных колебаний – 14 мс, частота собственных колебаний – 71,4 Гц.

Измерения на мосте крана – время воздействия – 838 мс, время затухания – 623 мс, период собственных колебаний – 25 мс, частота собственных колебаний – 40,0 Гц.

Измерения на траверсе – время воздействия – 417 мс, период собственных колебаний – 29 мс, частота собственных колебаний – 34,5 Гц.

Проведенные эксперименты подтвердили возможность определения частоты собственных колебаний элементов металлоконструкций крана при резкой разгрузке бады с металлоломом. Возможная практическая реализация – установка пьезоэлектрических датчиков измерительной системы вибрационных колебаний в главных балках завалочного крана.

Стабильность частот собственных колебаний элементов служит подтверждением неизменности технического состояния металлоконструкций.

Выводы

1. Существующие представления об упруго-демпфирующих характеристиках металлоконструкций мостовых кранов определяют коэффициент жёсткости и коэффициент демпфирования как параметры, влияющие на характер колебаний элементов конструкций.

2. Математическое моделирование динамических процессов в металлоконструкции мостового крана на основании 2-х и 3-х массовых расчётных схем показывает необходимость уточнения значений упруго-демпфирующих параметров конкретных механизмов

3. Проведенный лабораторный эксперимент и эксперимент на модели литейного крана показывают возможность оценки степени затухания колебаний, как диагностического параметра работоспособности металлоконструкций мостового крана.

4. Предложенная последовательность изучения упруго-демпфирующих свойств металлоконструкций мостового крана требует выполнения измерений параметров колебаний на действующем оборудовании, представляет одно из направлений дальнейших исследований.

5. Практическая реализация предлагаемого подхода позволяет получить индикаторный метод оценки состояния металлоконструкций мостового крана, предвещающий проведение экспертного обследования с использованием методов неразрушающего контроля.

Список литературы

1. РД 10-112-5-97 Методические указания по проведению обследования кранов мостового типа с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации. Часть 5. Краны мостовые и козловые
2. ПБ-10-382-00. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2003. – 272 с.

3. Бондаренко В.А. Теоретическое исследование спектров вибрации и шума рельс при движении мостовых кранов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том8, – №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/23TVN316.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., КиберЛенинка: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskoe-issledovanie-spektrov-vibratsii-i-shuma-rels-pri-dvizhenii-mostovyh-kranov>
4. Haniszewski T., Gaska D. Overhead traveling crane vibration research using experimental wireless measuring system / TRANSPORT PROBLEMS 2013 Vol.8 Issue 1, P. 57-66.
5. Фидровская Н.Н., Слепужников Е.Д., Чернышенко А.В., Варченко И.С. Новая конструкция ходовых колес мостовых кранов [Текст] // Современные тенденции технических наук: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2015 г.). – Казань: Бук, 2015. – С. 66-70. – URL <https://moluch.ru/conf/tech/archive/163/8878/> (дата обращения: 06.11.2019).
6. Лобов Н.А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути / Н.А. Лобов – М. Из-во МГТУ, 2003. – 232с.
7. Курсовое проектирование грузоподъемных машин [Учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов / Казак С.А. и др.]; Под ред. С.А. Казака. – Москва: Высш. шк., 1989. – 318 с., ил.; 24 см.; ISBN 5-06-000143-1
8. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин [Текст]: [Учеб. пособие для техн. вузов] / Ф.К. Иванченко, В.С. Бондарев, Н.П. Колесник, В.Я. Барабанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1978. – 574 с.
9. Руденко, Н.Ф. Курсовое проектирование грузоподъемных машин [Текст]: [Учеб. пособие для машиностроит. специальностей вузов] / Н.Ф. Руденко, М.П. Александров, А.Г. Лысяков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1971. – 463 с.
10. Характеристики и конструктивные схемы. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов. Т.2 / [М.П. Александров и др.]. – Ленинград: Машиностроение: Ленингр. Отд., 1988. – 559,[1] с.: ил. – (Справочник по кранам. В 2 т. Под общ. ред. М.М. Гохберга.); ISBN 5-217-00289-1
11. Майзель В.С. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. Учеб. пособ. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд., 1966. – 182 с.
12. Эльяш Н.Н. Металлоконструкции подъемно-транспортных машин: Электронное учебное пособие (конспект лекций). Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед.-ун-та, 2015. – 62 с.

E.V. Oshovskaya /c.t.s./, V.A. Sidorov /d.t.s./, D.O. Prudchenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

**THE SEQUENCE OF STUDYING THE ELASTIC-DAMPING PROPERTIES
OF BRIDGE CRANE METAL STRUCTURES**

***Annotation.** The paper considered the elastic-damping properties of metal structures of a foundry bridge crane with damping of vibrations after force exposure as a diagnostic sign of the operable state of this element. The results of mathematical modeling, laboratory and model experiments are presented.*

***Keywords:** foundry crane, metal structures, damping.*

Сведения об авторах

Е.В. Ошовская

SPIN-код: 6249-3730
Телефон: +7 (949) 358-53-34
Эл. почта: evo2008@bk.ru

Д.О. Прудченко

SPIN-код: 1025-0586
Телефон: +7 (949) 372-14-39
Эл. почта: dimoon8695@gmail.com

В.А. Сидоров

SPIN-код: 2618-4815
Телефон: +7 (949) 312-79-13
Эл. почта: sidorov_va58@mail.ru

*Статья поступила 13.09.2022 г.
© Е.В. Ошовская, В.А. Сидоров, Д.О. Прудченко, 2022
Рецензент д.т.н., проф. А.В. Яковченко*

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

1. Основной текст статьи должен содержать такие необходимые элементы, выделенные заголовками, как:

- **постановка проблемы** в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;
- **анализ последних исследований и публикаций**, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;
- формулировка **цели (задачи) исследования**;
- изложение **основного материала исследования** с полным обоснованием полученных научных результатов;
- **выводы** по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. текстовыми элементами, должна быть объемом **8...10 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20 мм** с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

3. Структура статьи (каждый элемент с новой строки): код УДК; инициалы и фамилии авторов с указанием ученой степени каждого (количество авторов **не более 3-х** от одной организации); название организации, город, где работают авторы; название статьи; аннотация на русском языке (объемом **не более 300** символов); ключевые слова (**от 3 до 5**); основной текст статьи; список литературы. Сокращение слов в тексте, рисунках и таблицах не допускается.

В аннотации на русском языке сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии авторов, ученые степени, организации, города, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке

Аннотация на английском языке должна представлять собой резюме, призванное выполнять функцию независимого от статьи источника информации. Резюме должно быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не являться калькой аннотации на других языках), содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированным (следовать логике описания результатов в статье), компактным, но не коротким (объемом **от 250 до 300** слов). Типичная структура резюме: состояние вопроса (**Background**); материалы и/или методы исследования (**Materials and/or methods**); результаты (**Results**); заключение (**Conclusion**).

Внимание! Убедительная просьба не разбивать текст на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это усложняет редакторскую обработку статьи!

4. **Обязательным условием** является наличие в статье графического материала (рисунков, графиков, схем, фотографий), размером **не менее 80×80** мм, в формате *.tif или *.jpg, разрешением **не менее 300 dpi**. Графический материал внедренными объектами размещается по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Все позиции, обозначенные на рисунках, должны быть объяснены в тексте. Под каждым рисунком указывается его порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце). Рисунки должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

Внимание! Запрещается внедрять графические материалы в виде объектов, связанных с др. программами, например, с КОМПАС, MS Excel и т.п. Рисунки, выполненные непосредственно в MS Word не принимаются.

5. Математические формулы необходимо выполнять с помощью редактора формул **MS Equation Editor 3.0** в соответствии со следующими размерами: обычный символ – **11** пт; крупный индекс – **7** пт; мелкий индекс – **5** пт; крупный символ – **13** пт; мелкий символ – **8** пт.

Все величины, входящие в формулы, должны быть объяснены в тексте. Формулы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу. Формулы выполняются курсивом, **кроме цифр и символов греческого алфавита**. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от формулы) **только в том случае**, если в тексте на них имеются ссылки.

Внимание! Количество формул в статье **не более 5**. Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

6. Таблицы должны иметь порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце) и располагаться по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Таблицы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

7. **Обязательным условием** является наличие в статье списка литературы, который приводится после выводов через один интервал (пустую строку) под заголовком **Список литературы**. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу по тексту заключаются в квадратные скобки. В списке литературы должно быть **не менее 3-х** публикаций, вышедших **за последние 5 лет**, а также **не менее 3-х** зарубежных (англоязычных) публикаций.

Для принятия решения о публикации статьи в журнале, в адрес редакции необходимо выслать:

– сопроводительное письмо (с указанием, что статья ранее нигде не публиковалась) от организации, где работают авторы и сведения об авторах статьи;

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc).

В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан адрес персональной эл. почты. Для ускорения подготовки очередных номеров журнала, просьба передавать сопроводительное письмо в отсканированном виде, электронный вариант статьи и сведения об авторах по эл. почте на адрес: vestnikdonntu@donntu.ru.

Внимание! Убедительная просьба, проверить получение редакцией материалов любым из способов (электронной почте или по телефонам **+7 (856) 301-07-89, +7 (949) 439-95-16** Радченко Ирина Владимировна **+7 (856) 301-09-67, +7 (949) 450-78-57** Ефименко Лариса Петровна).

Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо от организации, где работают авторы или сведения об авторах.