

ISSN 1810-1909

Вестник

ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3 2017

Технические науки

Научный журнал

Основан в марте 1995 г.

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Главный редактор

А.Ю. Александров, кандидат экономических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

Заместитель главного редактора

Г.А. Белов, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

Члены редакционной коллегии

А.А. Афанасьев, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

В.В. Афанасьев, доктор технических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

А.В. Булычев, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

Н.П. Вашкевич, доктор технических наук, профессор (Пенза, Россия)

Н.А. Галанина, доктор технических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

Л.С. Зимин, доктор технических наук, профессор (Самара, Россия)

Ю.К. Евдокимов, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

А.Г. Коробейников, доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург, Россия)

А.Б. Кувалдин, доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)

С.Л. Кужеков, доктор технических наук, профессор (Новочеркасск, Россия)

А.Л. Куликов, доктор технических наук (Нижний Новгород, Россия)

Ю.Я. Лямец, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

В.И. Мелешин, доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)

Ю.М. Миронов, доктор технических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

А.В. Мокеев, доктор технических наук, доцент (Архангельск, Россия)

В.А. Песошин, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

А.А. Потапов, доктор физико-математических наук, профессор (Москва, Россия)

В.В. Сагарадзе, доктор технических наук, член-корреспондент РАН (Екатеринбург, Россия)

И.Г. Сидоркина, доктор технических наук, профессор (Йошкар-Ола, Россия)

А.И. Федотов, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

Л.М. Шарнин, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

Ответственный секретарь

Н.И. Завгородняя

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Адрес редакции: 428015, Чебоксары, Московский пр., 15,
тел. (8352) 45-20-96, 58-33-63 (доб. 2030)
e-mail: vestnik210@mail.ru, vestnik@chuvsu.ru
<http://www.chuvsu.ru/university/vestnik.htm>

Рыбаков Л.М., Макарова Н.Л., Захватаева А.О. Совершенствование средств молниезащиты, используемых в сельской местности.....	130
Семыкина И.Ю., Кипервассер М.В., Герасимук А.В. Исследование переходного процесса в цепи тока при дефекте мультипликатора турбокомпрессора и разработка структурной схемы системы обнаружения дефекта мультипликатора.....	138
Славутский А.Л. Моделирование совместного (группового) выбега асинхронных двигателей в узле комплексной нагрузки при потере питания.....	145
Соколов Н.С., Викторова С.С. Разрядное устройство для изготовления буровой набивной сваи	152
Соколов Н.С., Кадышев Е.Н. Электроразрядная технология для устройства буроинъекционных свай.....	159
Тарасов В.А., Тарасова В.В. Статистический анализ электрических режимов дуговой электропечи постоянного тока.....	165

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Бычкова И.Ю. Моделирование задержки импульсных ультразвуковых сигналов в конвективном потоке над нагретой поверхностью	173
Галанина Н.А., Охоткин Г.П., Иванова Н.Н., Алексеев А.Г. Системы обработки сигналов на базе ПЛИС и цифровых сигнальных процессоров	180
Гришенцев А.Ю., Елсуков А.И., Коробейников А.Г., Сидоркина И.Г. Разработка и модельная реализация приёмопередающего устройства скрытого подшумового обмена широкополосными радиосообщениями.....	195
Иваницкий А.Ю., Кузнецов С.П., Мочалов В.В., Чуев В.П. Обратные элементы и делители нуля в алгебрах Клиффорда и Грассмана.....	207
Иванов С.О., Ильин Д.В., Большаков И.Ю. Сравнительное тестирование языков программирования	222
Иванова Н.Н., Галанина Н.А. Анализ накопления результатов цифровой фильтрации в системе остаточных классов .	228
Охоткин Г.П., Угарин С.В. Синтез логического устройства релейной системы автоматического регулирования тока при несимметричной коммутации ключей вентильного преобразователя	236
Охоткин Г.П., Угарин С.В. Моделирование на Multisim релейных систем автоматического регулирования тока при несимметричной коммутации ключей вентильного преобразователя	245
Песошин В.А., Кузнецов В.М., Рахматуллин А.Х. Генераторы псевдослучайных последовательностей не максимальной длины на основе регистра с внутренними сумматорами по модулю два (Часть 3).....	251
Родзин С.И., Родзина О.Н., Эль-Хатиб С.А. Гибридный муравьиный алгоритм сегментации медицинских изображений	262
Смирнов В.И., Сидоркина И.Г. Методика анализа технических средств разведки с использованием физических эффектов	273
Правила для авторов.....	282

УДК 621.51 (621.313)

ББК 31.261.62 (31.56)

И.Ю. СЕМЫКИНА, М.В. КИПЕРВАССЕР, А.В. ГЕРАСИМУК

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ ТОКА ПРИ ДЕФЕКТЕ МУЛЬТИПЛИКАТОРА ТУРБОКОМПРЕССОРА И РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТА МУЛЬТИПЛИКАТОРА

Ключевые слова: турбокомпрессор, мультипликатор, синхронный двигатель, мощность, контроль электрических и механических параметров, функциональная схема.

В статье рассмотрена ситуация дефектности зубчатой пары мультипликатора турбокомпрессорной установки с целью анализа влияния этого события на значения амплитуды и гармонического состава тока статора приводного электродвигателя. Анализ необходим для оценки применимости метода косвенной диагностики аварийных режимов работы оборудования по средствам контроля тока. Для решения поставленной задачи разработана математическая модель турбокомпрессорной установки в рассматриваемой аварийной ситуации. Для получения диаграммы и спектрограммы тока фазы статора электродвигателя проведено математическое моделирование работы турбоустановки с дефектным мультипликатором в среде MatLab Simulink. По полученным данным сделан вывод о возможности применения косвенного метода диагностики аварийных режимов работы для анализа состояния зубчатых пар мультипликатора с целью создания новой системы защиты роторного оборудования от механических неисправностей на базе указанного метода. Предложена функциональная схема разрабатываемой системы.

Турбокомпрессоры широко применяются в промышленности, в частности на предприятиях горнодобывающей и металлургической отраслей. В процессе эксплуатации турбокомпрессорная установка подвержена негативным воздействиям: износу трущихся поверхностей, снижению прочности высоконагруженных частей вследствие явления усталости металла, ослаблению соединений из-за вибраций. Указанные явления, при продолжительном воздействии, приводят к неисправностям и аварийным ситуациям агрегата. К характерным неисправностям турбокомпрессора относятся: осевой сдвиг вала турбины, нецилиндричность шейки валов, нарушение центровки валов, дефекты зубчатых соединений редуктора и соединительных муфт.

Обычно оборудование компрессорных станций работает в условиях периодического осмотра дежурным персоналом. Существующие технологические защиты контролируют ограниченный набор параметров, к которым относятся давление и температура смазки подшипников, температура газа в рабочих ступенях агрегата. Контроль указанных параметров не является достаточным для быстрого, оперативного выявления перечисленных ранее аварийных ситуаций. Поэтому неисправности выявляются с запаздыванием, что увеличивает тяжесть последствий и продолжительность послеаварийных ремонтов. В таких условиях целесообразно задействовать все возможные методы контроля и защиты работающего агрегата, в том числе – косвенные.

Известен способ диагностики состояния работающих агрегатов посредством контроля параметров приводного электродвигателя. В статье выполнена оценка применимости метода для диагностики и обнаружения ситуации возникновения дефектов зубчатой пары мультипликатора.

Известно, что износ зубчатых колёс мультипликатора турбоустановки происходит неравномерно. Тихоходная ведущая шестерня изнашивается медленнее, чем быстроходная ведомая. Это обусловлено большей частотой вращения, так как зубья ведомой шестерни большее число раз входят в зацепление. По мере износа у колёс перестаёт совпадать шаг зацепления, появляются вибрации на зубцовой частоте быстроходного колеса [4] и некоторый добавочный момент сопротивления. Основным типом привода турбокомпрессоров является синхронный электродвигатель (СД). На основании соотношения, устанавливающего связь между током статора и моментом двигателя, можно утверждать, что при таком виде неисправности в токе статора двигателя будут возникать высшие гармоники [3]:

$$M_{\text{МЭХ}} \approx M_{\text{ЭМ}} = \frac{3E_0 U_C}{\omega X_d} \cos(\theta) = \frac{3E_0 I}{\omega} \cos(\theta), \quad (1)$$

где $M_{\text{МЭХ}}$ и $M_{\text{ЭМ}}$ – механический и электромагнитный моменты СД, Н·м; U_C – напряжение сети, В; ω – угловая скорость ротора СД, рад/с; I – ток статора, А; X_d – синхронное сопротивление, Ом; θ – угол нагрузки СД, градусы.

Суммарная мощность нагрузки на валу двигателя будет представлять собой периодическую функцию времени, имеющую постоянную и переменную составляющие:

$$N(t) = N_K + N_H(t), \quad (2)$$

где $N_K = \text{const}$ – мощность, потребляемая компрессором, кВт; $N_H(t)$ – наброс мощности из-за износа колёс в функции времени, кВт.

Известно, что механическая мощность и момент линейно связаны следующим соотношением:

$$N_K = \frac{M_{\text{МЭХ}} \pi n}{30}, \quad (3)$$

где n – частота вращения дефектного колеса, об./мин.

Величина наброса мощности вследствие износа колёс будет изменяться от нуля до некоторого максимального значения по мере вхождения зубьев в зацепление, а затем – уменьшаться до нуля по мере выхода их из зацепления. В результате наброс мощности будет носить периодический характер, а период его возникновения будет обратно пропорционален зубцовой частоте быстроходной шестерни:

$$T_H = \frac{1}{\nu_{32}} = \frac{60}{Z_2 n_2}, \quad (4)$$

где Z_2 – число зубьев быстроходного колеса.

Частота наброса мощности составит

$$\nu_{32} = \frac{Z_2 n_2}{60}. \quad (5)$$

В графике механической мощности нагрузки будут появляться колебания. Форма колебаний мощности будет определяться процессами нагружения и разгрузки зубьев и будет близка к синусоиде с длительностью периода T_H .

Для анализа рассматриваемой ситуации и последующего её моделирования зависимость наброса мощности на валу от времени представлена функцией, принимающей значения от 0 до некоторого амплитудного значения, выраженного величиной N_{H*} , в долях N_K :

$$N_H(t) = N_{H*} N_K \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T_H}\right) \right]. \quad (6)$$

С учётом формул (3) и (4) формула (6) примет вид

$$N_H(t) = N_{H*} N_K \left[1 - \cos\left(\frac{Z_2 n_2 \pi t}{30}\right) \right]. \quad (7)$$

Мощность нагрузки от турбокомпрессора, работающего в номинальном режиме, выразится формулой [1]

$$N_K = \frac{P_{\text{АТМ}} Q_K}{\eta_{\text{из}} \eta_{\text{из}}} \ln\left(\frac{P_K}{P_{\text{АТМ}}}\right), \quad (8)$$

где $\eta_{\text{из}}$ – изотермический КПД; $\eta_{\text{м}}$ – механический КПД; $P_{\text{АТМ}}$ – атмосферное давление, кПа; $P_K = P_{\text{Кизб}} + P_{\text{АТМ}}$ – конечное давление воздуха на выходе из турбокомпрессора, кПа; Q_K – производительность турбокомпрессора, м³/с.

Учёт потерь мощности в мультипликаторе и возрастание нагрузки на двигатель могут быть учтены формулой [5, 6]

$$N_D = \frac{N_K}{\eta_{\text{ш}} \eta_{\text{п}}^n}, \quad (9)$$

где N_K – механическая мощность, которую необходимо подвести к турбокомпрессору от приводного двигателя при номинальных условиях работы, МВт; $\eta_{\text{ш}}$ – КПД шевронной передачи; $\eta_{\text{п}}$ – КПД подшипников качения; n – количество подшипников качения в мультипликаторе.

Для получения сведений о наличии высших гармоник в токе статора электродвигателя при наличии износа колёс мультипликатора выполнено моделирование работы воздушной турбоустановки в составе компрессора К-1500-62-2, мультипликатора Р8000/1,49 и синхронного неявнополюсного электродвигателя СТД-10000, а также питающей сети мощностью 80 МВА. Номинальные частота вращения ротора турбокомпрессора и избыточное давление составляют 4470 об./мин и 759,9 кПа, соответственно¹. Номинальные частота вращения электродвигателя и мощность составляют 3000 об./мин и 10 МВт, соответственно (полная мощность – 11,4 МВА). Принимается, что амплитуда наброса составляет 1% от номинальной нагрузки компрессора. Имитация режима износа шестерён начинается на сто восьмидесятой секунде моделирования. В качестве среды моделирования использовался программный комплекс MatLab Simulink. Синхронный электродвигатель моделируется известным методом на основании уравнений Горева [2, 9], при помощи стандартного блока из библиотеки элементов программы [8]. Моменты инерции всех элементов турбоустановки учтены в модели электродвигателя как суммарный приведённый момент к валу двигателя. Анализ гармонических составляющих тока статора производится с применением

¹ Типовой проект 405-4-53. Узел компрессии воздуха К-1500-62-2 [Электронный ресурс]. URL: <http://megamorm.ru/Index2/2/4294850/4294850436.htm>.

полосового фильтра с окном Кайзера. Ожидалось появление высшей гармоники с частотой ~ 4 кГц (на основании формулы (5)).

На рис. 1 приведена структурная схема Simulink-модели турбоустановки. Результаты гармонического анализа представлены на рис. 2 и 3.

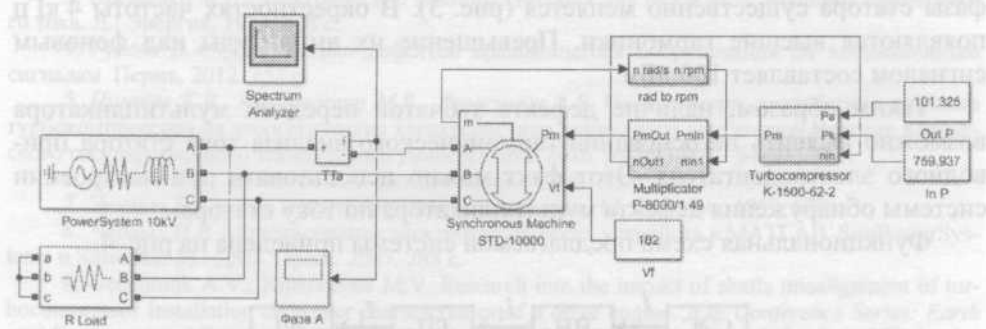


Рис. 1. Функциональная структура математической модели турбокомпрессорной установки

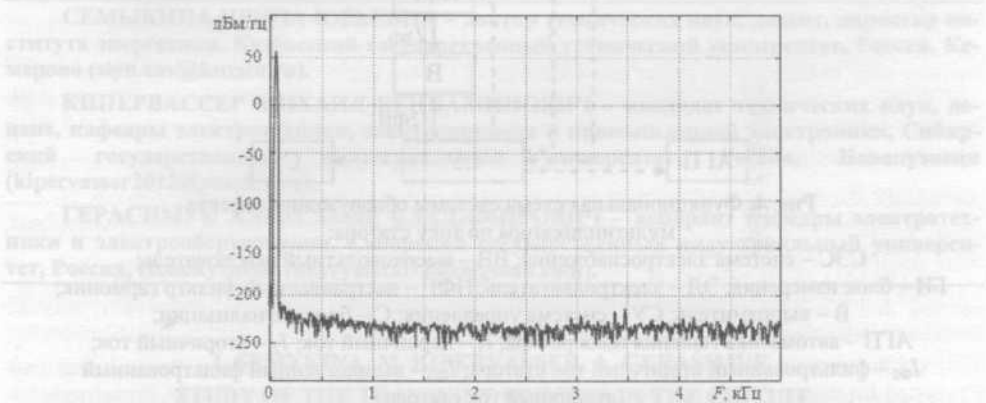


Рис. 2. Спектрограмма тока фазы статора в нормальном режиме работы

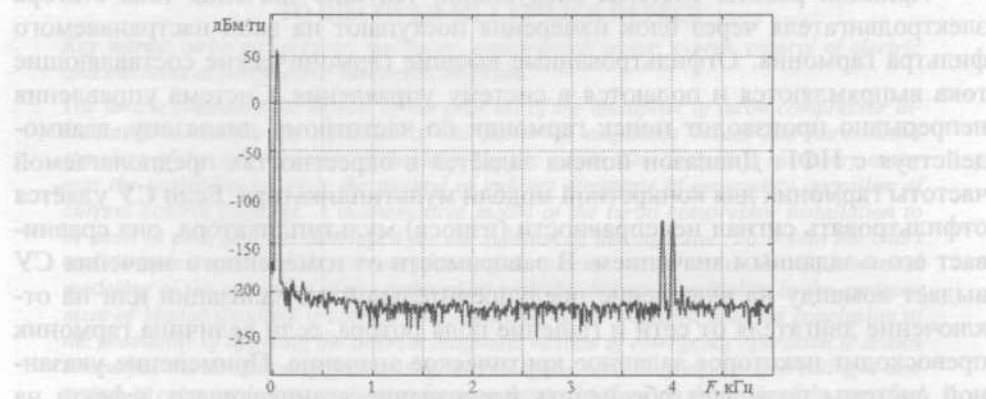


Рис. 3. Спектрограмма тока фазы статора при возникновении дефекта в мультипликаторе

В нормальном режиме работы в спектре тока статора присутствует только основная гармоническая составляющая тока – 50 Гц. Остальные гармоники практически отсутствуют или представлены слабым сигналом (рис. 2). При работе двигателя с изношенным мультипликатором спектрограмма тока фазы статора существенно меняется (рис. 3). В окрестностях частоты 4 кГц появляются высшие гармоники. Превышение их амплитуды над фоновым сигналом составляет 100 дБм.

Таким образом, наличие дефекта зубчатой передачи мультипликатора возможно выявить на основании гармонического анализа тока статора приводного электродвигателя. Этот факт можно использовать при построении системы обнаружения дефекта мультипликатора по току статора.

Функциональная схема предлагаемой системы приведена на рис. 4.

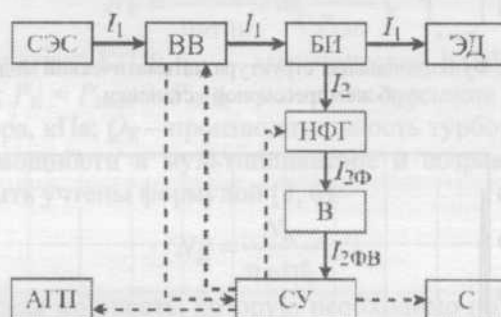


Рис. 4. Функциональная схема системы обнаружения дефекта мультипликатора по току статора:

СЭС – система электроснабжения; ВВ – высоковольтный выключатель;
БИ – блок измерения; ЭД – электродвигатель; НФГ – настраиваемый фильтр гармоник;
В – выпрямитель; СУ – система управления; С – блок сигнализации;
АПГ – автоматика гашения поля ротора; I_1 – первичный ток; I_2 – вторичный ток;
 $I_{\Phi 2}$ – фильтрованный вторичный ток статора; $I_{\Phi В}$ – выпрямленный фильтрованный вторичный ток статора

Принцип работы системы следующий: текущие значения тока статора электродвигателя через блок измерения поступают на вход настраиваемого фильтра гармоник. Отфильтрованные высшие гармонические составляющие тока выпрямляются и подаются в систему управления. Система управления непрерывно производит поиск гармоник по частотному диапазону, взаимодействуя с НФГ. Диапазон поиска задаётся в окрестностях предполагаемой частоты гармоник для конкретной модели мультипликатора. Если СУ удаётся отфильтровать сигнал неисправности (износа) мультипликатора, она сравнивает его с заданным значением. В зависимости от измеренного значения СУ выдаёт команду на включение предупредительной сигнализации или на отключение двигателя от сети и гашение поля ротора, если величина гармоник превосходит некоторое заданное критическое значение. Применение указанной системы позволяет обеспечить распознавание возникающего дефекта на ранней стадии.

Литература

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. М.: КноРус, 2012. 350 с.
2. Горев А.А. Переходные процессы синхронных генераторов. М.: Госэнергоиздат, 1960. 551 с.
3. Костенко М.П. Электрические машины: учебник для вузов. Ч. 2. Машины переменного тока. Л.: Энергия, 1973. 648 с.
4. Руссов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. Пермь, 2012. 252 с.
5. Пузачёв Е.В., Кипервассер М.В., Герасимук А.В. Исследование воздействия помпажа турбокомпрессора на энергетические характеристики приводного двигателя // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 2(114). С. 84–91.
6. Тюняев А.В., Звездаков В.П. Детали машин. СПб.: Лань, 2013. 736 с.
7. Эккерт Б. Осевые и центробежные компрессоры. М.: Машгиз, 1959. 678 с.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.
9. Gerasimuk A.V., Kipervasser M.V. Research into the impact of shafts misalignment of turbocompressor installation on power characteristics of a drive engine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 45: Int. Sci. and Res. Conf. on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources 7–10 June 2016, Novokuznetsk, Russian Federation. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/45/1/012011>.

СЕМЬКИНА ИРИНА ЮРЬЕВНА – доктор технических наук, доцент, директор института энергетики, Кузбасский государственный технический университет, Россия, Кемерово (siyu.eav@kuzstu.ru).

КИПЕРВАССЕР МИХАИЛ ВЕНИАМИНОВИЧ – кандидат технических наук, доцент, кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, Новокузнецк (kipervasser2012@yandex.ru).

ГЕРАСИМУК АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ – аспирант кафедры электротехники и электрооборудования, Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, Новокузнецк (heavymetal7200@gmail.com).

I. SEMYKINA, M. KIPERVASSER, A. GERASIMUK
STUDY OF THE TRANSIENT PROCESS IN THE CIRCUIT
IN CASE OF TURBOCOMPRESSOR MULTIPLIER DEFECT
AND DEVELOPMENT OF SYSTEM STRUCTURAL SCHEME
TO DISCOVER MULTIPLIER DEFECT

Key words: turbo compressor, multiplier, synchronous motor, power, control of electric and mechanical parameters, functional diagram.

The article considers the defects of the gear set of the multiplier of turbo compressor installation to analyze the influence of this factor on amplitude values and harmonious structure of the stator current of the drive electric motor. The analysis is necessary to assess the possibility to apply the method of indirect diagnosis of emergency operation of current control facilities. A mathematical model of the turbo compressor installation to be used in emergency is developed for the solution of the objective. To obtain the chart and the spectrogram of the current phase of the electric motor stator the mathematical modeling of the operation of the turbo plant with the defective multiplier in the environment of MatlabSimulink is carried out. According to the obtained data the conclusion of the possibility of applying the indirect diagnosis method of emergency operation is drawn to analyze the condition of gear sets of the multiplier with the purpose of creating a new system of rotor equipment protection from mechanical failure on the basis of the specified method. The structurally functional scheme of the developed system is offered.

References

1. Bystritskii G.F. *Osnovy energetiki: uchebnik dlya vuzov* [Fundamentals of power: the textbook for higher education institutions]. Moscow, KnoRus Publ., 2012, 350 p.
2. Gorev, A. A. *Perekhodnye protsessy sinkhronnykh generatorov* [Transition processes of synchronous generators]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1960, 551 p.
3. Kostenko M. P. *Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya vuzov. Ch. 2. Mashiny peremennogo toka* [Electrical machines: the textbook for higher education institutions. Part 2: Machines of alternating current]. Leningrad, Energiya Publ., 1973, 648 p.
4. Russov V.A. *Diagnostika defektov vrashchayushhegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam* [Diagnostics of defects of rotating equipment by vibration signals]. Perm, 2012, 252p.
5. Pugachev E.V., Kipervasser M.V., Gerasimuk A.V. *Issledovanie vozdeistviya pompazha turbokompressora na energeticheskie harakteristiki privodnogo dvigatelya* [Study on the impact of the surge of turbocharger on the energy characteristics of the drive motor]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 2(114), pp. 84–90.
6. Tyunyaev A. V., Zvezdakov V. P. *Detali mashin* [Machine components]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013, 736 p.
7. Ekkert B. *Osevye i tsentrobezhnye kompressory* [Axial-flow and centrifugal compressors]. Moscow, 1959, 678 p.
8. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrotechnical devices in MATLAB. SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008, 288 p.
9. Gerasimuk A.V., Kipervasser M.V. Research into the impact of shafts misalignment of turbocompressor installation on power characteristics of a drive engine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 45: International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources 7–10 June 2016, Novokuznetsk, Russian Federation, doi:10.1088/1755-1315/45/1/012011.

SEMYKINA IRINA – Doctor of Technical Sciences, Director of Energy Institute, Kuzbass State Technical University, Russia, Kemerovo (siyu.eav@kuzstu.ru).

KIPERVASSER MICHAIL – Candidate of Technical Sciences, Head of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk (kipervasser2012@yandex.ru).

GERASIMUK ALEKSANDR – Post-Graduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk (heavymetal7200@gmail.com).

Ссылка на статью: Семькина И.Ю., Кипервассер М.В., Герасимук А.В. Исследование переходного процесса в цепи тока при дефекте мультипликатора турбокомпрессора и разработка структурной схемы системы обнаружения дефекта мультипликатора // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 3. – С. 138–144.