

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Институт ядерной энергии и промышленности



ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ, ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ – 2023

сборник статей международной научно-практической конференции
18–21 сентября 2023 г.



Севастополь, 2023

УДК 502/504(06)

ББК 20.1я43

Э 40

Э 40 Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023 : сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 18–21 сентября 2023 г. / под ред. Д.М. Сытника, Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук. – Севастополь : СевГУ, 2023. – 654 с.

ISBN 978-5-6050377-3-6

Environmental, Industrial and Energy Security – 2023 : a collection of articles on the materials of the international scientific and practical conference, Sevastopol, September 18–21, 2023 / Ed. by D.M. Sytnikov, G.V. Kucherik, Yu.A. Omelchuk. – Sevastopol : SevSU, 2023. – 654 p.

Настоящий сборник статей составлен по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023», состоявшейся в г. Севастополе 18–21 сентября 2023 года. В представленном сборнике обсуждаются актуальные научные вопросы и практическое применение полученных результатов научных исследований.

Сборник предназначен для научных работников, представителей профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов; может быть полезен как в научной, так и в образовательной деятельности.

Ответственность за достоверность представленных результатов исследований, а также за соблюдение требований законодательства об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов.

УДК 502/504(06)

ББК 20.1я43

This collection of articles was compiled based on the materials of the international scientific and practical conference «Environmental, industrial and energy security – 2023», held in Sevastopol on September 18–21, 2023. The presented collection discusses topical scientific issues and practical application of the results of scientific research.

The collection is intended for researchers, employees of the faculties, post-graduate students and students; it can be useful both in scientific and educational activities.

The authors of the published materials are responsible for the reliability of the presented research results, as well as for compliance with the requirements of intellectual property legislation.

ISBN 978-5-6050377-3-6

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»

<i>Лей В.А., Никишин В.В., Багаев А.В.</i> Результаты анализа данных мониторинга гидрохимического состояния истока реки Чёрной (Крым) за 2017–2022 гг...	299
<i>Малеев Н.В., Мхатвари Т.Я., Эренбург В.И.</i> О некоторых способах и технологических мероприятиях борьбы с газодинамическими явлениями в угольных шахтах.....	303
<i>Миндубаев А.З., Акосах Й.А., Бадеева Е.К.</i> Рост <i>Aspergillus niger</i> AM1 в культуральной среде с двумя ксенобиотиками.....	308
<i>Моисеев Д.В., Лукина Л.И., Цофнас Д.А.</i> Выявление больных сахарным диабетом с помощью глубокой нейронной сети, разработанной в пакете <i>Matlab</i>	310
<i>Суксин Н.Е., Шумилова М.А.</i> Технология утилизации отработанных гальванических растворов никелирования.....	314
<i>Геряева Г.Н., Лядов С.С.</i> Переработка отходов полиэтилентерефталата.....	318
<i>Ломовцева С.Д., Патрушева Г.Н., Храпко Н.Н.</i> Оксидные антикоррозионные покрытия, полученные экстракционно-пиролитическим методом.....	321
<i>Храпко Н.Н., Патрушева Г.Н., Ломовцева С.Д.</i> Защита от УФ-излучения при проведении сварочных работ.....	325
<i>Шаленный В.Г.</i> Ресурсосберегающая конструктивно-технологическая система многэтажного сборно-монолитного каркасного строительства повышенной сейсмостойкости.....	329
СЕКЦИЯ 4. СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	
<i>Березный П.В.</i> Ключевые тренды развития энергетики блока разведки и добычи ПАО «Газпром нефть».....	335
<i>Воронина Е.В., Крюков А.В.</i> Учет влияния опор при моделировании электромагнитных полей тяговых сетей магистральных железных дорог.....	339
<i>Герасимук А.В., Кипервассер М.В.</i> Исследование поведения тока статора синхронного электропривода промышленного турбокомпрессора в аварийных режимах с учётом насыщения магнитной цепи электродвигателя.....	344
<i>Гутьеррес Н., Зулета Д.П.</i> Конструкция мобильного робота для задач гуманитарного разминирования.....	348
<i>Дегтерев А.Х.</i> Влияние потепления на расход электроэнергии для кондиционирования помещений.....	355
<i>Завьялов В.М., Абейдуллин С.А., Гайдук С.В.</i> Исследование влияния параметров резонансного R-S контура на КПД беспроводной передачи энергии.....	358
<i>Завьялов В.М., Смокмаль Н.Н., Велиляев А.С.</i> Анализ энергетических характеристик резонансного контура беспроводной зарядной станции при слабых связях и асимметрии параметров.....	363
<i>Зайцева Н.М.</i> Особенности разработки интеллектуальной энергосистемы с мощным энергоемким нелинейным производством.....	367
<i>Канов Л.Н.</i> Повышение надежности энергетических систем на основе нейронных сетей.....	373
<i>Кремков М.В., Гулаганов Н.Г.</i> Обеспечение энергетической безопасности Узбекистана: этапы и методы.....	378
<i>Нечипоренко Я.А., Олифиренко В.К.</i> Разработка и исследование измерительного датчика тока на базе катушки Роговского для электроэнергетических си-	

УДК 621.51.(621.313)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТОКА СТАТОРА СИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОМЫШЛЕННОГО ТУРБОКОМПРЕССОРА В
АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ С УЧЁТОМ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

А.В. Герасимук¹, М.В. Кипервассер²

¹АО «Сибирский Тяжпромэлектропроект» г. Новокузнецк,
654007, Россия, e-mail: kipervasser2012@ya.ru

²Сибирский государственный индустриальный университет г. Новокузнецк,
654005, Россия, e-mail: heavy-metal7200@yandex.ru

Центробежные турбокомпрессоры широко применяются для реализации технологических процессов на различных промышленных предприятиях. К ним относятся газоперекачивающие станции различного назначения, станции воздухоразделения предприятий черной металлургии, компрессорные станции предприятий химической и горной промышленности. Турбокомпрессоры представлены на этих объектах достаточно большим разнообразием конструктивных исполнений и мощностей, работают в различных эксплуатационных условиях, имеют разные категории ответственности. Ввиду большой мощности в малых габаритах, высоких скоростей вращения роторов, высоких температур, значительных величин механических усилий в элементах конструкции условия работы узлов и деталей центробежных турбокомпрессоров являются тяжёлыми, а к самим турбокомпрессорам предъявляются жесткие требования по надежности, безопасности работы и обслуживания. Авария турбокомпрессора может быть сопряжена со значительными экономическими потерями вследствие недопуска продукции, остановки производства, нарушениями работы сопряжённых технологических агрегатов, а также может привести к созданию опасных условий для персонала. В этой связи своевременная диагностика аварийных ситуаций турбокомпрессорных агрегатов является актуальной задачей.

Обязательными для турбокомпрессорных установок являются защиты приводных электродвигателей. Набор таких защит определяется правилами устройства электроустановок и рекомендациями завода изготовителя. Также обязательными являются противопомпажные системы, системы контроля положения роторов, контроля показателей систем смазки и охлаждения. Существующие защиты компрессорных агрегатов защищают их от ограниченного числа аварийных ситуаций. При этом защиты электродвигателей практически нечувствительны к неисправностям и авариям механической части турбоагрегатов.

Развивающимся перспективным типом защиты и контроля турбокомпрессорных агрегатов являются предиктивные системы защиты и диагностики, работающие по принципу сигнатурного частотного и амплитудного анализа тока статора приводного электродвигателя. Такие системы в настоящее время разрабатываются для диагностики неисправностей электродвигателей [1, 2]. Целями таких систем является:

- заблаговременное определение ненормального режима работы оборудования, до того момента, когда начинает работать основная защита и автоматика, реагирующая уже на тяжелую стадию неисправности;
- распознавание аварийного режима и отключение оборудования в случае, если основная релейная защита и автоматика не сработала.

Основной принцип защит строится на анализе либо характерных отклонений тока, присущих конкретному виду неисправности, либо на основе частотного анализа тока и выделения характерного спектра гармонических составляющих, так же характеризующих определённые неисправности.

В работах [3–5] были рассмотрены неисправности и ненормальные режимы работы турбокомпрессорных установок: помпаж турбокомпрессора, дефект зубчатой передачи мультипликатора установки, расцентровка валов агрегатов турбокомпрессорной установки. Были разработаны математические модели оборудования и проведён ряд компьютерных моделирований, в результате чего были определены характерные особенности поведения тока статора при указанных неисправностях. Моделирование синхронного электродвигателя проводилось как с использованием стандартных моделей на уравнениях Парка-Горева, так и на основании трёхфазной модели в естественных фазных координатах.

Одним из принимаемых допущений при моделировании принималось ненасыщенное состояние магнитной системы электродвигателя. Интерес представляет собой то, как поведёт себя ток электродвигателя, если насыщение магнитопровода будет учитываться.

Расчёт влияния насыщения магнитопровода, путём введения соответствующих поправок в полные дифференциальные уравнения в естественных фазных координатах представляет собой затруднительную задачу ввиду отсутствия в паспортных данных большого количества соответствующих индуктивностей рассеяния [6–8]. В стандартных моделях Simulink, использующих уравнения Парка-Горева, предусмотрена возможность учёта насыщения методом задания характеристики холостого хода машины как функции напряжения статора от тока возбуждения $I_F = f(U_S)$ в относительных единицах [9]. Данная характеристика является паспортной для синхронных машин. Для электродвигателя типа СТД-10000 характеристика имеет вид:

Таблица 1

Характеристика холостого хода синхронного электродвигателя типа СТД-10000

I_F , о.е.	0	0,4	0,5	0,58	0,62	0,66	0,85	1	1,16	1,3	1,5	1,73	2	2,3
U_S , о.е.	0	0,43	0,54	0,63	0,68	0,72	0,89	1,02	1,14	1,22	1,32	1,29	1,45	1,5

Уравнения потокосцепления статора определяются уравнениями [10]:

$$\begin{cases} \Psi_d = -(K_S L_{adu} + L_d) i_d + K_S L_{adu} (i_{fd} + i_{ld}) \\ \Psi_q = -(L_{aq} + L_q) i_q + L_{aq} i_{lq} \end{cases} \quad (1)$$

где Ψ_d , Ψ_q – потокосцепления по продольной и поперечной оси, L_{adu} – ненасыщенная взаимная индуктивность оси d статора, L_d и L_q – собственные индуктивности статора по продольной и поперечной оси, i_{fd} , i_{ld} и i_{lq} – токи, протекающие в цепи возбуждения, демпферной обмотке оси d и демпферной обмотке оси q, K_S – коэффициент насыщения, определяемый как функция:

$$K_S = L_{ad} / L_{adu} = f(V_{ag}) = f(\Psi_{at}) \quad (2)$$

где V_{ag} – напряжение воздушного зазора, Ψ_{at} – потокосцепление воздушного зазора

$$\Psi_{at} = L_{ad} i_{fd} \quad (3)$$

$$L_{ad} = dV_{ad} / di_{fd} \quad (4)$$

Моделирование с использованием программного комплекса Simulink проводилось для турбокомпрессорной установки в составе турбокомпрессора типа К-1500-62-2 с мультипликатором типа Р-8000-1,49 и приводным электродвигателем типа СТД-10000-2 для режимов помпажа, дефекта зубчатой передачи мультипликатора и расцентровки валов компрессора и мультипликатора. Модель самого турбокомпрессора выполнена на основании уравнений Мура-Грейтцера [11], а приводного элек-

тродвигателя – на основании уравнений Парка-Горева. Для сравнительных целей проведено моделирование с учётом и без учёта насыщения магнитной цепи.

На основании данных, полученных ранее в [2, 3, 5], известно, что при возникновении аварийной ситуации спектральный состав тока меняется, появляются дополнительные гармонические колебания. На рис. 1–3 представлены спектрограммы тока статора приводного электродвигателя турбокомпрессора. Светлым цветом показаны спектрограммы для ненасыщенного режима.

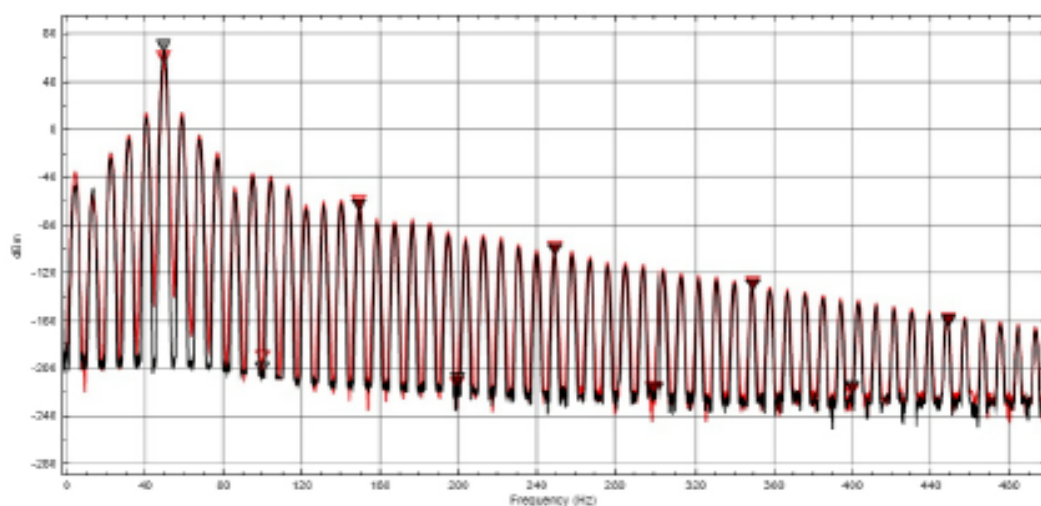


Рис. 1. Поведение тока статора синхронного электродвигателя при помпаже турбокомпрессора

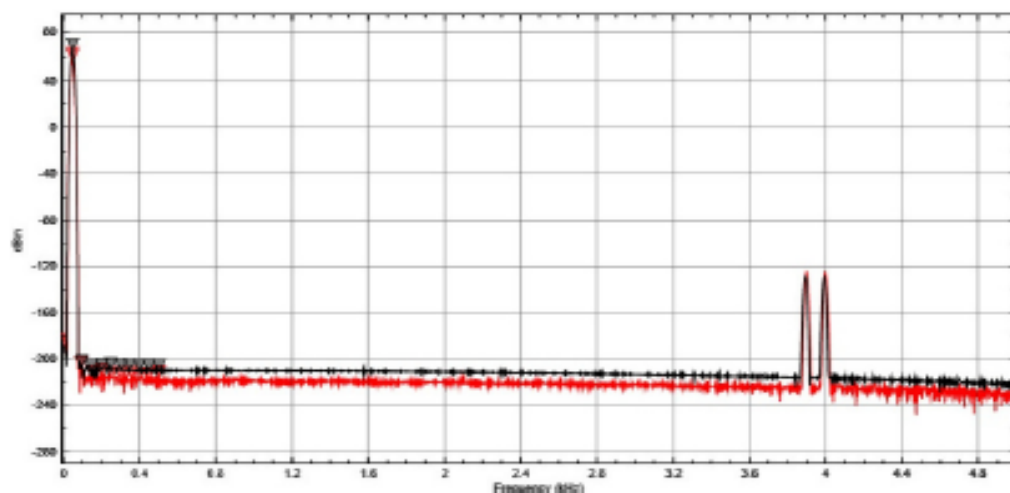


Рис. 2. Поведение тока статора синхронного электродвигателя при наличии дефекта зубчатой передачи мультипликатора турбокомпрессора

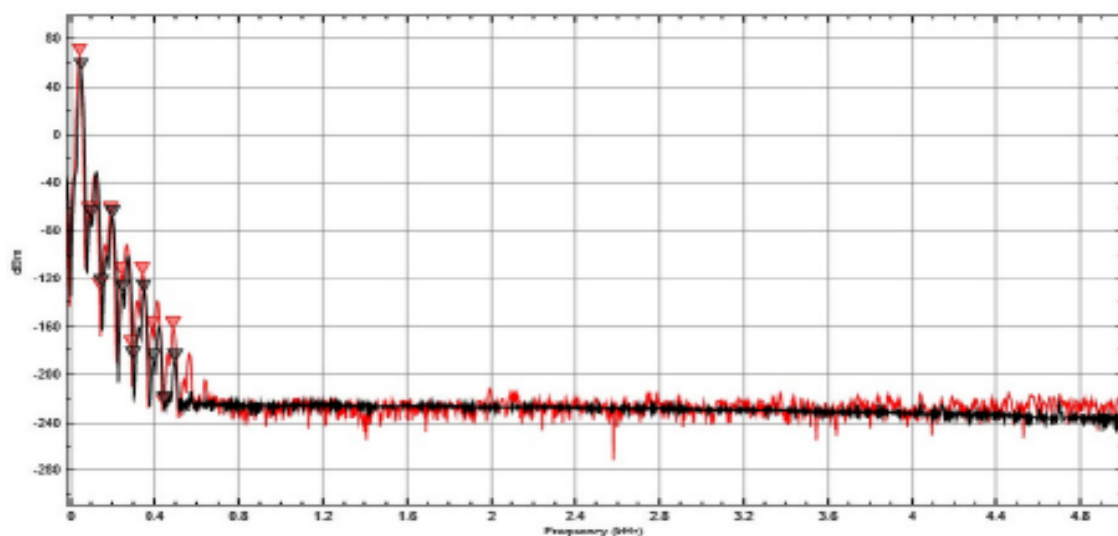


Рис. 3. Поведение тока статора синхронного электродвигателя при расцентровке валов турбокомпрессора и мультипликатора

Как можно видеть из спектрограмм, каждой неисправности соответствует своя сигнатура частотного спектра.

Помпаж турбокомпрессора сопровождается значительной генерацией гармоник в сеть (рис. 1) в диапазоне от 5 до 500–550 Гц. Так как помпаж является низкочастотным процессом с частотой модуляции тока статора значительно ниже частоты сети, то распознавание помпажа турбокомпрессора по току целесообразно выполнять в низкочастотной области.

При работе двигателя с дефектным мультипликатором спектрограмма тока фазы статора существенно меняется (рис. 2). В окрестностях механической зубцовой частоты, для рассматриваемого мультипликатора, равной 4 кГц, появляются соответствующие ей электрические гармонические составляющие тока.

При расцентровке валов компрессора и мультипликатора так же появляются гармонические составляющие, кратные основной частоте 50 Гц, вплоть до 450 Гц (рис. 3). Набор гармонических составляющих схож с ситуацией помпажа, но не захватывает низкочастотную область до 50 Гц.

Что касается различий спектрального состава при насыщении магнитопровода, то он полностью идентичен. Различие заключается только в несколько более запущенном высшими гармоническими составляющими сигнале в целом, но их амплитуда незначительна и не вносит сколь-нибудь заметных искажений в полезный сигнал.

На основании сделанных выводов можно констатировать, что учёт насыщения магнитопровода при спектральном анализе тока статора для указанных режимов можно не выполнять, так как это не вносит дополнительных уточнений в полученный результат, но значительно усложняет математические модели, особенно для моделей в фазных координатах.

Список литературы:

1. Irfan M. Advanced Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electric Machines. Najran: Najran University. – 2018. – P. 307.
2. Song X., Wang Z., Hu J. 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) // Detection of Bearing Outer Race Fault in Induction Motors using Motor Current Signature Analysis. – 2019. – P. 1–5.
3. Семькина И.Ю. Математическое моделирование неисправностей насосно-компрессорного оборудования и его диагностика на основе метода анализа тока

- статора приводного электродвигателя / И.Ю. Семькина, М.В. Кипервассер, А.В. Герасимук // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 2(126). – С. 155–166. DOI 10.26730/1999-4125-2018-2-155-165
4. Kipervasser M.V. Detection of centrifugal turbocompressor surge by drive motor current / M. V. Kipervasser, A. V. Gerasimuk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Novokuznetsk, Virtual, 08–11 сентября 2020 года. – Novokuznetsk, Virtual, 2021. – P. 012041. DOI 10.1088/1755-1315/823/1/012041
 5. Семькина И.Ю. Исследование переходного процесса в цепи тока при дефекте мультипликатора турбокомпрессора и разработка структурной схемы системы обнаружения дефекта мультипликатора / И.Ю. Семькина, М.В. Кипервассер, А.В. Герасимук // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 3. – С. 138–144.
 6. Тумаева Е.В. Математическая модель синхронного электропривода: монография / Е.В. Тумаева. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2007.
 7. Сипайлов Г.А. Электрические машины (специальный курс). – Москва: Высшая школа, 1984. – 287 с.
 8. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 2007. – 327 с.
 9. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. Москва: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
 10. Synchronous Machine Salient Pole: [Электронный ресурс]. – URL: <https://la.mathworks.com/help/sps/ref/synchronousmachinesalientpole.html?sessionid=7ceb5616bd2175734de2492f6371>
 11. Greitzer E.M. Surge and Rotating stall in axial flow compressors. Part I: Theoretical compression system model // Journal of Engineering for Power. – 1976. – P. 190–198.

RESERTH OF STATOR CURRENT BEHAVIOR OF SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF INDUSTRIAL TURBOCOMPRES- SOR IN VARIOUS EMERGENCY MODES

A.V. Gerasimuk¹, M.V. Kiperwasser²,

*¹JSC Siberian HeavyIndustruElectroProject, Novokuznetsk,
654007, Russia, e-mail: kipervasser2012@ya.ru*

*²Siberian State Industrial University, Novokuznetsk,
654005 Russia, e-mail: heavymetal7200@yandex.ru*

Adstract.

The article considers mathematical modeling of various emergency modes of operation of an industrial turbocharger, shows the characteristic features of the spectral composition of the stator current for each of them, and also compares the simulation results with and without saturation of the magnetic circuit of the electric motor.

УДК 620.97

КОНСТРУКЦИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ ЗАДАЧ ГУМАНИТАРНОГО РАЗМИНИРОВАНИЯ

Н. Гутьеррес¹, Д.П. Зулета²

*¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск,
305040, Россия, e-mail: guti.uio@gmail.com*

²Факультет архитектуры градостроительства Университета УТЕ, Эквадор

Научное издание

УДК 502/504(06)

ББК 20.1я43

Э 40

Э 40 Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023 : сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 18–21 сентября 2023 г. / под ред. Д.М. Сытникова, Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук. – Севастополь : СевГУ, 2023. – 654 с.

ISBN 978-5-6050377-3-6

Environmental, Industrial and Energy Security – 2023 : a collection of articles on the materials of the international scientific and practical conference, Sevastopol, September 18–21, 2023 / Ed. by D.M. Sytnikov, G.V. Kucherik, Yu.A. Omelchuk. – Sevastopol : SevSU, 2023. – 654 p.

На русском и английском языках

ISBN 978-5-6050377-3-6



9 785605 037736 >