



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**Розаев Иван Андреевич**

**АЛГОРИТМЫ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО  
УПРАВЛЕНИЯ  
ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
ОБЪЕКТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Томск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАО ВО НИ ТПУ)

**Научный руководитель:**

**Однокопылов Георгий Иванович**

доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Официальные оппоненты:**

**Рулевский Виктор Михайлович**

доктор технических наук, доцент, ректор Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

**Полищук Владимир Иосифович**

доктор технических наук, профессор, декан энергетического факультета Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Защита диссертации состоится 15 сентября 2022 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ДС. ТПУ12 при ФГАОУ ВО Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу 634050, г. Томск, ул. Усова 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.12  
кандидат технических наук



подпись

Андреев Михаил Владимирович

ФИО

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Большинство современных промышленных объектов имеет в своем составе управляемый электропривод (ЭП). Отказ такого механизма на производстве с длительным или безостановочным циклом изготовления продукции может привести к остановке производства в связи с невозможностью полноценного функционирования механизмов. В настоящее время особое внимание уделяется отказоустойчивости и живучести электроприводов в составе комплексов, работающих с потенциально опасными или стратегически значимыми для страны ресурсами, такими, как нефть и газ, ракетными и авиационными системами и системами жизнеобеспечения и транспортировки. В таких комплексах в качестве исполнительного электродвигателя возможно применение вентильно-индукторных электродвигателей (ВИД) различного исполнения. Установка электроприводов на базе ВИД может значительно улучшить технологический процесс и обеспечить отказоустойчивость и безопасность промышленных систем, повысить энергетические показатели.

Целесообразно применение вентильно-индукторного электропривода (ВИП) в автомобильном транспорте в составе гибридных силовых установок. В нефтедобыче отказ исполнительного двигателя приводит к остановке производства и, как следствие, к значительным экономическим потерям.

Документом, подтверждающим востребованность в развитии комплексов с безопасным и надежным электроприводом, является Распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 N 1662-р (ред. от 08.08.2009) «О Концепции долгосрочного социально-экономического развития промышленности и строительства», где определен рост потребности в транспортной технике с высокой степенью надежности и безотказной работы. Для решения задач по обеспечению эксплуатационной живучести и увеличения рабочего ресурса таких производственных объектов значительно возрастает роль разработки и внедрения отказоустойчивого алгоритмического управления исполнительными электродвигателями. Вопросы построения отказоустойчивых электроприводов рассмотрены в работах российских и зарубежных ученых: В.А.Кузнецова, В.А.Кузьмичева, П.Г.Вигриянова, П.О.Шабурова, Г.К.Птаха, В.Ф.Козаченко, М.М.Лашкевича, В.В.Агафонова, В.Н.Острирова, А.М.Русакова, Д.Е.Корпусова, С.А.Пахомина, Д.И.Алямкина, А.В. Дроздова, Г.И.Однокопылова, И.Ф.Нугаева, А.П.Темирёва, С.В.Александровского, Д.М.Глухова, Ю.Н.Митрофаненкова и других, зарубежных ученых: Nguyen Kuang Kkhoa, Miller T. J., Krishnan R., Sangshin Kwan, Lawrenson P.J. MacMinn S.R., Hamid A. Toliyat, Ruba M., Anders M., Thomas M. Jahns, Irimia N.D., Simon A., Rolf Isermann, Gerling D., Schramm A. Jen-Ren Fu, Thomas A., Lipo Brian, A. Welchko, Yihua Hu, Chun Gan, Wenping Cao, Stephen Finney, M. R. Feyzi, Y. Ebrahimi и других.

Диссертационная работа направлена на разработку алгоритмов отказоустойчивого управления ВИП производственных объектов.

**Объект исследований:** вентильно-индукторный электропривод в аварийных и неполнофазных режимах работы.

**Предмет исследований:** математическое и алгоритмическое обеспечение отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом в аварийных и неполнофазных режимах работы.

**Цель работы:** разработка алгоритмов отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом производственных объектов.

**Для достижения цели решаются следующие задачи:**

1. Разработать математическую и имитационную модели вентильно-индукторного электропривода в штатных и аварийных режимах работы электроцентробежного насоса (ЭЦН) и транспортного средства (ТС) с вентильно-индукторным электроприводом.

2. Разработать и исследовать алгоритмы отказоустойчивого управления трехфазных вентильно-индукторных электроприводов при однократных и множественных отказах.

3. Разработать математическую и имитационную модели бездатчикового ВИП насосного агрегата в аварийных и неполнофазных режимах работы.

**Методы исследования.** В работе применены: положения основ математической теории электрических машин; численные методы, используемые при описании динамических электрических, механических и магнитных процессов; математическое моделирование и программирование в среде Matlab Simulink, C++; тепловой расчет электродвигателя в среде Motor-CAD; численные методы Эйлера и Рунге-Кутты 4 порядка; методы цифровой фильтрации сигналов.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая и имитационная модели вентильно-индукторного электропривода в штатных и аварийных режимах работы ЭЦН и ТС с ВИД.

2. Алгоритмы отказоустойчивого управления трехфазных ВИП в составе производственных объектов при однократных и множественных отказах.

3. Математическая и имитационная модели бездатчикового ВИП насосного агрегата в аварийных и неполнофазных режимах работы.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается корректным применением математических методов и моделей, адекватность которых по отношению к реальным процессам подтверждена результатами теоретических и компьютерно-имитационных исследований в программной среде Matlab; сравнением результатов моделирования с имеющимися наработками отечественных и зарубежных ученых.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Созданы математическая и имитационная модель установки электроцентробежного насоса и транспортного средства с отказоустойчивым вентильно-индукторным электродвигателем в качестве исполнительного двигателя и мотор-колеса (МК) в аварийных и неполнофазных режимах работы.

2. Выполнены исследования алгоритмов отказоустойчивого управления, позволяющие частично или полностью восстановить работоспособность трехфазных ВИП при однократных и множественных отказах, в том числе и для случая многосекционного исполнения обмоток статора ВИП.

3. Разработаны математическая и имитационная модели бездатчикового ВИП насосного агрегата в аварийных и неполнофазных режимах работы позволяющая подтвердить работоспособность предложенного алгоритма отказоустойчивого управления.

#### **Практическая ценность работы.**

1. Разработана методика диагностики и алгоритмического восстановления работоспособности вентильно-индукторного электропривода [1-3,6].

2. Разработаны технические решения по построению отказоустойчивых мостовых и полумостовых преобразовательных ячеек с защитными элементами блокирования отказов [9, 10].

3. Предложено схемное решение по построению отказоустойчивого вентильно-индукторного многосекционного электропривода с повышенной живучестью при множественных отказах [8].

**Реализация результатов работы.** Результаты, полученные в диссертационной работе, приняты к внедрению ООО «Мехатроника-Софт» (г. Томск), а также используются в учебном процессе отделения электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики Томского политехнического университета (НИ ТПУ).

**Личный вклад автора.** Все основные научные результаты, выносимые на защиту и составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора состоит в следующем: в публикациях автором разработаны и сформулированы принципы отказоустойчивого управления [1-3, 16-18, 20, 26-32], математические модели отказоустойчивых электроприводов [4-7, 11-15, 18] и алгоритмическое управление с целью восстановления полной или частичной работоспособности [9, 10, 22-25], технические решения по реализации отказоустойчивого управления [8-13]. Автор участвовал в разработке программных средств, в проведении и анализе результатов исследований.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** В соответствии с формулой специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» в диссертации содержатся теоретические и экспериментальные исследования в соответствии с пунктом 3, позволившие разработать алгоритмы восстановления работоспособности в реальном времени для ВИП; в соответствии с пунктом 4, исследовать работоспособность и оценить качество функционирования ВИП при отказах силовых цепей с восстановлением полной или частичной работоспособности.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались: на научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», ОАО «НПЦ Полус», г. Томск, 2013г., 2015г.; на VI международной научно-технической

конференции «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 2013г.; на всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2013 г.; на международной научно-технической конференции «Науки о Земле: современное состояние и приоритеты развития», г. Дубай (ОАЭ), 2013 г.; на I международной научно-технической конференции «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития», г. Йошкар-Ола, 2013 г.; на всероссийской конференции «Введение в энергетику», г. Кемерово, 2014 г.; на научном форуме «Инженеры будущего», г. Уфа, 2014 г.; на международной конференции « Информационные технологии в науке, управлении, в социальной сфере и медицине», г. Томск, 2014 г.; на международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2014 г.; на конференции «20th International Conference for Students and Young Scientists: Modern Techniques and Technologies», г. Томск, 2014 г.; на конференции «International Siberian conference on control and communications», г. Омск, 2015 г.; на всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», г. Иркутск, 2015 г.; на стратегическом форуме «11th International Forum on Strategic Technology», г. Новосибирск, 2016 г.; на IV международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 2016 г.; всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», Кемерово, 2018 г. На научно-технических семинарах энергетического института ТПУ 2015-2021 гг.

**Публикации.** Основные положения диссертации, отражены в 32 печатных работах. Из них 5 статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus/WoS, 2 статьи в издании из перечня рекомендованных ВАК РФ, 1 патент РФ на изобретение, 5 патентов РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и 3 приложений. Работа содержит 160 стр. основного текста, 86 рисунков, 6 таблиц и библиографический список из 143 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Во введении** обоснована актуальность исследований, поставлены цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведен краткий обзор содержания глав.

**В первой главе** проведен обзор литературы по тематике отказоустойчивых вентильно-индукторных электроприводов. Рассмотрены известные технические решения применения отказоустойчивых вентильно-индукторных электроприводов в промышленности. Сформулированы цели и задачи работы.

**Во второй главе** разработаны математические и имитационные модели отказоустойчивых вентильно-индукторных электроприводов односекционного и

двухсекционного исполнения, а также электропривода электроцентробежного насоса и транспортного средства на базе вентильно-индукторного двигателя в качестве исполнительной машины.

Для описания переходных процессов в неполнофазном режиме работы трехфазного ВИП приведена система уравнений математической модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d[i]}{dt} = [L_d]^{-1}\{[U] - [i][R_M] - \omega[K_\omega]\}; \\ [R_M] = ([1] + k_\infty[M_0])[R]; \\ T_\Pi = t_2 - t_1; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J}(M - M_c); \\ M = M_A(i_A, \theta_n) + M_B(i_B, \theta_n) + M_C(i_C, \theta_n); \\ \theta_n = p \int_0^t \omega dt = p\theta, \\ \omega = k_{\text{ВИП}} \frac{\omega_\omega}{p}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где:  $[i]$  – матрица фазных токов статора трехфазного ВИД;  $[U]$  – матрица фазных напряжений трехфазного ВИД;  $[M_0]$  – матрица отказов трехфазного ВИД;  $[L_d]$ ,  $[L_d]^{-1}$  – прямая и обратная матрица дифференциальных индуктивностей трехфазного ВИД в функции фазных токов и текущего положения ротора;  $[K_\omega]$  – матрица коэффициентов противо-ЭДС трехфазного ВИД в функции фазных токов и текущего положения ротора;  $[R]$  – матрица сопротивлений трехфазного ВИД до отказа и  $[R_M]$  – после отказа;  $[1]$  – единичная матрица, размером 3 на 3;  $k_\infty$  – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора;  $T_\Pi$  – время переключения структуры ВИП,  $t_1$  – момент времени выявленного отказа,  $t_2$  – момент времени восстановления значения частоты вращения (момента) до уровня предшествующего отказу;  $M$  – электромагнитный момент трехфазного ВИД;  $M_A(i_A, \theta)$ ,  $M_B(i_B, \theta)$ ,  $M_C(i_C, \theta)$  – моменты фаз А, В, С трехфазного ВИД соответственно в функции фазных токов и текущего положения ротора;  $M_c$  – момент сопротивления ВИД;  $J$  – суммарный момент инерции ЭП;  $\omega$  – частота вращения ротора;  $\omega_\omega$  – частота вращения поля статора ВИП;  $\theta_n$ ,  $\theta$  – механический и электрический углы ДПР;  $p$  – число пар полюсов,  $k_{\text{ВИП}}$  – коэффициент режима коммутации ВИП,  $k_{\text{ВИП}} = 1$  – симметричная одиночная коммутация,  $k_{\text{ВИП}} = 2$  – симметричная парная коммутация,  $k_{\text{ВИП}} = 1,5$  – несимметричная коммутация.

Для проверки работоспособности разработанной математической модели и алгоритмов диагностики и управления, разработана имитационная модель в среде моделирования MatLab Simulink. Имитационная модель односекционного отказоустойчивого ВИП со свойством живучести приведена на рис. 1

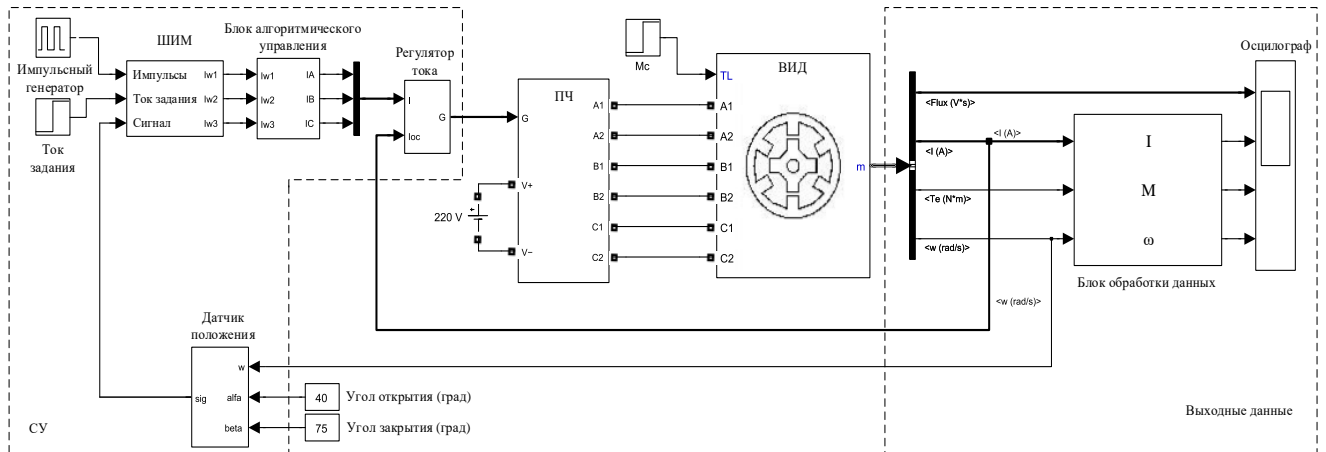


Рис. 1. Имитационная модель односекционного отказоустойчивого ВИП со свойством живучести.

Разработана математическая модель ЭЦН с ВИД (2) в виде системы уравнений дополняющих основную систему уравнений (1). Состояние ЭЦН определяется такими параметрами, как:  $Q$  - поток жидкости через ЭЦН;  $P$  - давление жидкости на выходе ЭЦН,  $H$  - напор жидкости ЭЦН.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c(\omega)); \\ M_c(\omega) = M + (M_{c\max} - \Delta M_{c\text{тр}} - \Delta M_{c\text{ж}}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}}\right)^2 \\ \theta_n = p \int_0^t \omega dt = p\theta; \\ \frac{P}{\rho \cdot g} = H_{fH} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 + S_f \cdot Q^2, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $\omega_{\text{НОМ}}$  – номинальное значение частоты вращения вала насоса,  $H_{fH}$  – принятый «фиктивный» уровень напора насоса на номинальной частоте вращения,  $S_f$  – принятое «фиктивное» значение гидравлического сопротивления насоса,  $\rho$  – значение плотности протекаемой жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\Delta M_{c\text{тр}}$  – момент сопротивления трения в ЭЦН,  $\Delta M_{c\text{ж}}$  – момент сопротивления протекаемой жидкости. Постоянная времени, определяющая инерцию изменения давления, уменьшается пропорционально уменьшению расхода и давления в скважине и не сказывается на системе управления в рассматриваемых условиях. Поэтому переходными процессами в жидкости и инерционностью ЭЦН в данной модели можно пренебречь. На базе предыдущей модели разработана имитационная модель электроцентробежного насоса добычи нефти.

Разработана математическая модель ТС с ВИД (3) в виде системы уравнений, дополняющих основную систему уравнений (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} M_c(\omega) = M + (M_{c\max} - \Delta M_{c\text{тр}}) \cdot J_\varepsilon \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}}\right)^2; \\ \theta_n = p \int_0^t \omega dt = p\theta; \\ S = \int_0^t \vartheta dt; \\ F_K = G \cdot \left(\gamma + K_\omega \cdot \vartheta^2 + K_J \cdot \frac{d\vartheta}{dt}\right). \end{array} \right. \quad (3)$$



Где  $F_K$  – суммарная сила тяги ТС;  $d\vartheta/dt$  – ускорение ТС;  $K_\omega = \frac{0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot L}{m \cdot g}$  и  $K_J = \frac{1}{g}$  – дополнительные вводимые коэффициенты;  $G = m \cdot g$  – полный вес автомобиля;  $m$  – масса ТС,  $g$  – ускорение свободного падения;  $C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\rho = 1,2 \text{ км/м}^3$  – плотность воздуха;  $L$  – площадь миделя;  $\vartheta$  – скорость ТС;  $\gamma = f(\cos\alpha + \sin\alpha)$ , где  $\alpha$  – угол уклона дорожного полотна,  $f$  – коэффициент сопротивления качению;  $S$  – перемещение ТС.

**В третьей главе** рассмотрено алгоритмическое обеспечение отказоустойчивого управления.

Использование исходной отказоустойчивости обеспеченной особенностью конструкции 3-фазного ВИД при отказах ПЧ или при обрыве одной из обмоток статора в аварийном 2-х фазном режиме позволяет обеспечить функционирование ЭП с ограничением момента и частоты вращения на уровне 2/3 от номинального значения. Для обеспечения повышенной отказоустойчивости и увеличения функциональных возможностей при работе как на двух, так и на одной, оставшейся в работе фазе электродвигателя, было разработано три алгоритма приведенных в таблице 1.

На рис. 2 приведены временные диаграммы переходных процессов частоты вращения  $\omega_{\text{ном}}$  односекционного ВИП (а), двухсекционного трехфазного ВИП (б) в процессе исчерпания рабочего ресурса. Зависимость «0» отражает применение алгоритмов отказоустойчивого управления в процессе исчерпания рабочего ресурса при последовательных отказах, зависимость «1» – увеличение амплитуды фазных токов, зависимость «2» – изменение угла перекрытия фаз, зависимость «3» – применение совмещенного алгоритма изменения угла перекрытия фаз и увеличения амплитуды фазных токов. Как следует из рис. 2, а трехфазный ВИП в аварийном двухфазном режиме ( $m = 2$ ) обеспечивает функционирование с ограниченной работоспособностью, проявляя свойство исходной отказоустойчивости с поддержанием частоты вращения на уровне 0,66 от номинального значения и при последующем отказе ЭП становится полностью неработоспособен при номинальной нагрузке.

В таблице 1 обозначено:  $\varphi(i_A, \theta)$ ,  $\varphi(i_B, \theta)$ ,  $\varphi(i_C, \theta)$  – значения формируемого угла для каждой фазы в функции фазных токов и угла нагрузки;  $I_\omega$  – мгновенное значение тока,  $\text{sign}(x)$  – функция, определяющая знак выражения (x);  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – биты отказов ВИП матрицы  $[M_0]$ , параметр  $k_d$  управления обеспечивает скачкообразное увеличение амплитуды фазных токов в аварийном режиме:  $k_d = (d + \bar{d}3/2)$ , для компенсации активной мощности отказавшей фазы двигателя:  $d = 1$  (отсутствие отказа)  $k_d = 1$ ;  $\bar{d} = 1$ , (наличие отказа)  $k_d = 3/2$ ,  $\theta_k$  – угол перекрытия фаз двигателя ( $\theta_k = \pi/4$ ).

Таблица 1.

№	Наименование алгоритма	Аналитическая запись алгоритма
0	Управление трехфазным ВИП с симметричной одиночной коммутацией и исходной отказоустойчивостью	$I_A = I_{\omega} \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \theta_A) - \theta) \right] / 2;$ $I_B = I_{\omega} \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \theta_B) - \theta) \right] / 2;$ $I_C = I_{\omega} \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \theta_C) - \theta) \right] / 2;$
1	Алгоритм управления трехфазным ВИП с симметричной одиночной коммутацией и компенсацией момента за счет увеличения амплитуды фазных токов	$I_A = I_{\omega} \bar{a} \cdot k_d \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \theta_A) - \theta) \right] / 2;$ $I_B = I_{\omega} \bar{b} \cdot k_d \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \theta_B) - \theta) \right] / 2;$ $I_C = I_{\omega} \bar{c} \cdot k_d \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \theta_C) - \theta) \right] / 2;$
2	Алгоритм управления трехфазным ВИП с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз	$I_A = I_{\omega} \bar{a} \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \theta_A) - \theta + d \cdot \theta_k) \right] / 2;$ $I_B = I_{\omega} \bar{b} \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \theta_B) - \theta + d \cdot \theta_k) \right] / 2;$ $I_C = I_{\omega} \bar{c} \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \theta_C) - \theta + d \cdot \theta_k) \right] / 2;$
3	Алгоритм управления трехфазным ВИП с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз и увеличения амплитуд фазных токов	$I_A = I_{\omega} \bar{a} \cdot k_d \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \theta_A) - \theta + d \cdot \theta_k) \right] / 2;$ $I_B = I_{\omega} \bar{b} \cdot k_d \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \theta_B) - \theta + d \cdot \theta_k) \right] / 2;$ $I_C = I_{\omega} \bar{c} \cdot k_d \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \theta_C) - \theta + d \cdot \theta_k) \right] / 2;$

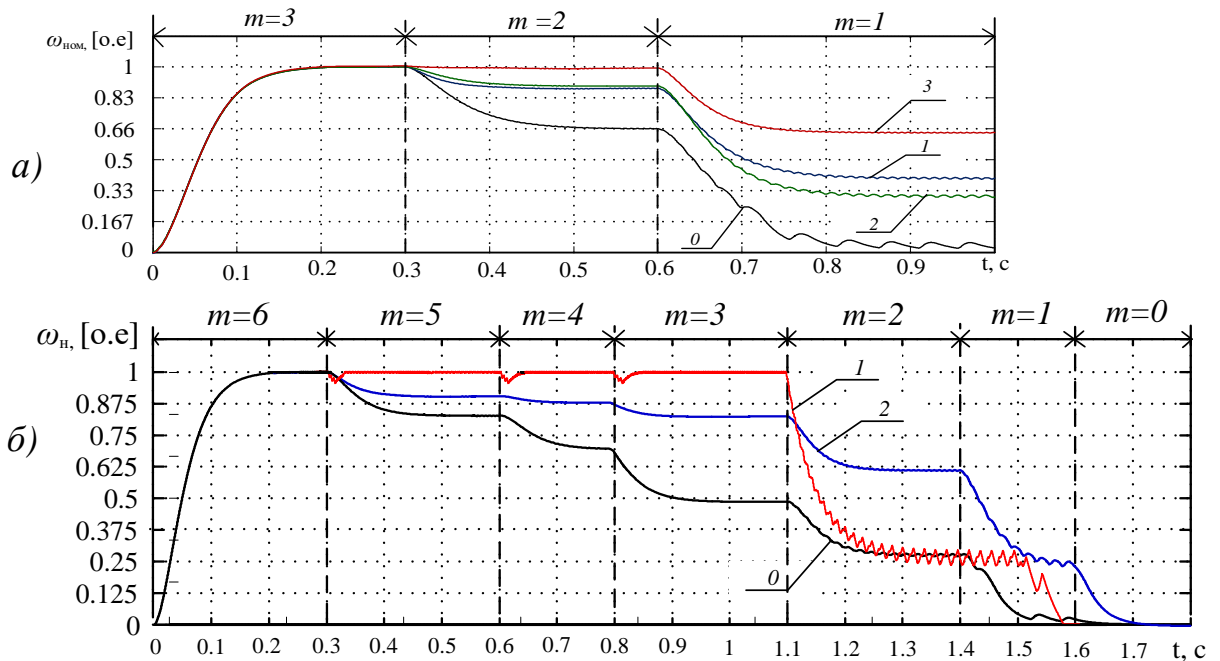


Рис. 2. Временные диаграммы переходных процессов изменения частоты вращения в односекционном ВИП (А):  $m = 3 \dots 1$ ; двухсекционном ВИП (Б):  $m = 6 \dots 1$ .

Разработанные алгоритмы отказоустойчивого управления (1-3) в аварийном двухфазном режиме односекционного трехфазного ВИП (рис. 2, а) позволяют обеспечить: (1) – поддержание значения частоты вращения на уровне 0,89 от номинального значения; (2) – поддержание частоты вращения на уровне 0,9; (3) – полное восстановление работоспособности при номинальной нагрузке; в аварийном однофазном режиме трехфазного ВИП обеспечить поддержание

частоты вращения (без возможности пуска) на уровне: (1) – 0,41; (2) – 0,32; (3) – 0,65 при номинальной нагрузке.

Как следует из рис. 2, б двухсекционный трехфазный ВИП в аварийных режимах ( $m = 5...1$ ) обеспечивает функционирование с ограниченной работоспособностью с поддержанием частоты вращения на уровне 0,9...0,26 при ( $m = 5...2$ ) при номинальной нагрузке. При работе с алгоритмом отказоустойчивого управления (1) в аварийном двухфазном режиме двухсекционного трехфазного ВИП позволяет обеспечить: полное восстановление работоспособности по частоте вращения при ( $m = 5...2$ ); в аварийном однофазном режиме обеспечить поддержание частоты вращения (без возможности пуска) на уровне 0,24; алгоритм отказоустойчивого управления (2) в аварийном двухфазном режиме двухсекционного трехфазного ВИП позволяет обеспечить: частичное восстановление работоспособности по частоте вращения на уровне 0,9...0,61 при ( $m = 5...2$ ); в аварийном однофазном режиме обеспечить поддержание частоты вращения (без возможности пуска) на уровне 0,24.

Рассмотрим напорно-расходные характеристики погружного ЭЦН с вентиляльно-индукторным электродвигателем. На рис. 3а приведена напорно-расходная характеристика для работы без алгоритмов компенсации: (строка 0 таблицы 1), на рисунке 3б напорно-расходная характеристика при работе с применением алгоритма компенсации токов фаз (строка 1 таблицы 1).

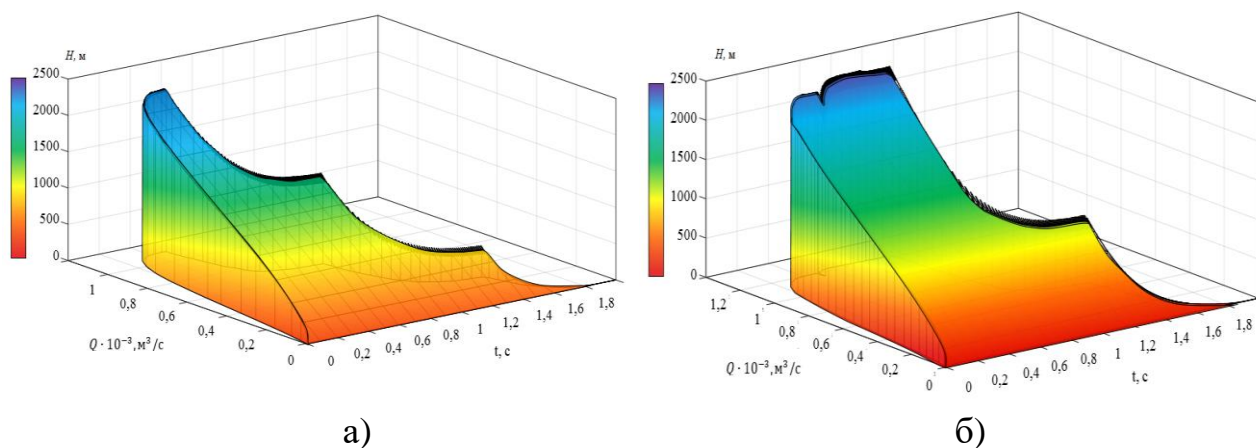


Рис. 3. а) напорно-расходная характеристика для работы без алгоритмов  
б) напорно-расходная характеристика при работе с применением алгоритма компенсации момента за счет увеличения амплитуд токов фаз.

На рисунке 4 показана блок-схема алгоритма отказоустойчивого управления УЭЦН с ВИД (рис. 4 а) и функциональная схема ЭЦН (рис.4 б)

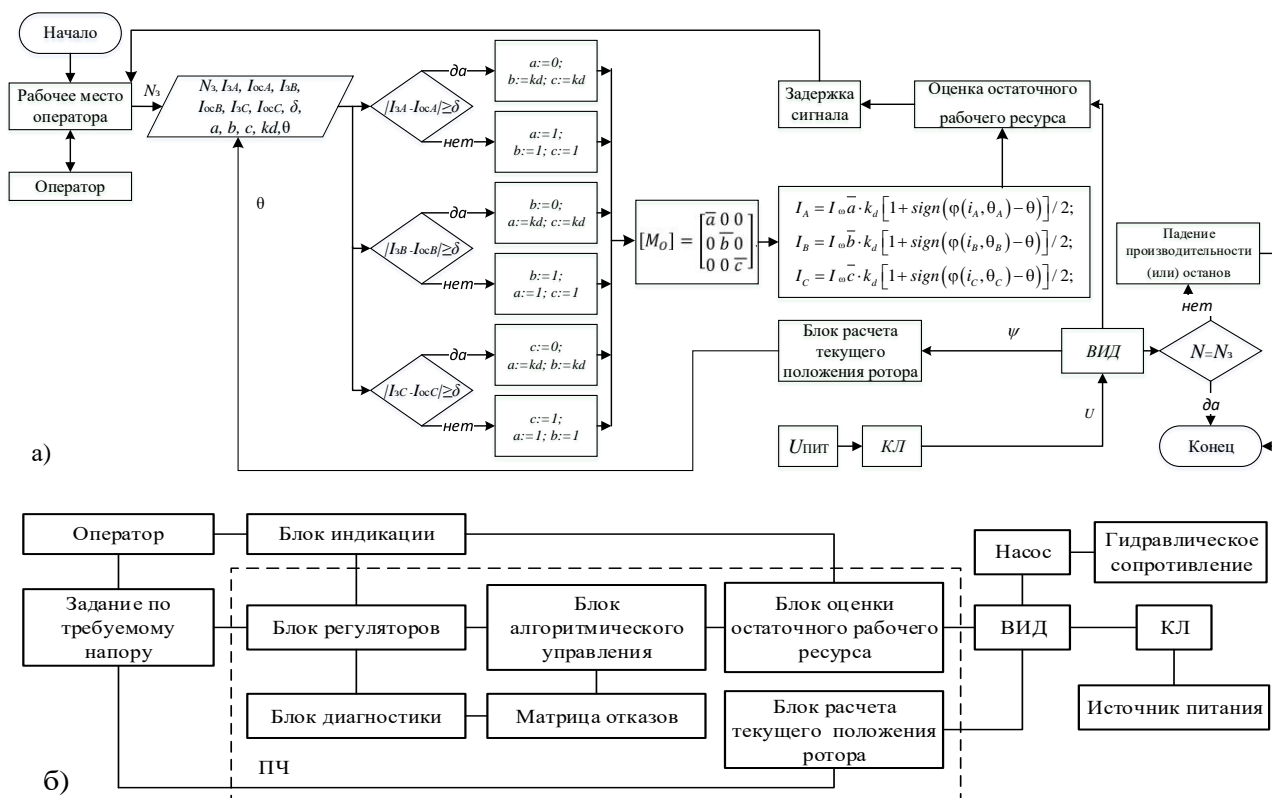


Рис. 4. а) блок схема алгоритма компенсации токов в ЭЦН с ВИД б) функциональная схема рассматриваемого ЭЦН с ВИД.

Как следует из рисунка 3б, при применении алгоритма компенсации фазных токов (рис. 4а) возможно полное восстановление работоспособности на двух фазах. Численные значения установившегося уровня потока нефти при последовательном аварийном отключении фаз электродвигателя сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

$Q$ для алгоритмов (0)-(3), в о.е относительно $Q_n$	3 фазы	2 фазы	1 фаза
(0)	1	0,66	0,33
(1)	1	1	0,66
(2)	1	0,9	0,59
(3)	1	0,94	0,74

Из анализа таблицы 2 следует, что при использовании исходной отказоустойчивости алгоритм (0) при неисправности в одной фазе электродвигателя, установившееся значение потока жидкости составляет 66% от номинального уровня, при обрыве двух фаз электродвигателя 33% соответственно. При этом показано, что двигатель может продолжать функционировать на одной оставшейся в работе фазе электродвигателя, что делает его уникальным по отношению к имеющимся в эксплуатации погружным насосным агрегатам, построенных на основе асинхронного и вентильного двигателей. При работе с алгоритмом (1) показана возможность полного восстановления работоспособности. На рис. 5 представлены расходные характеристики потока жидкости для алгоритмов (0)-(3) из таблицы 1 при последовательном аварийном отключении фаз электродвигателя.

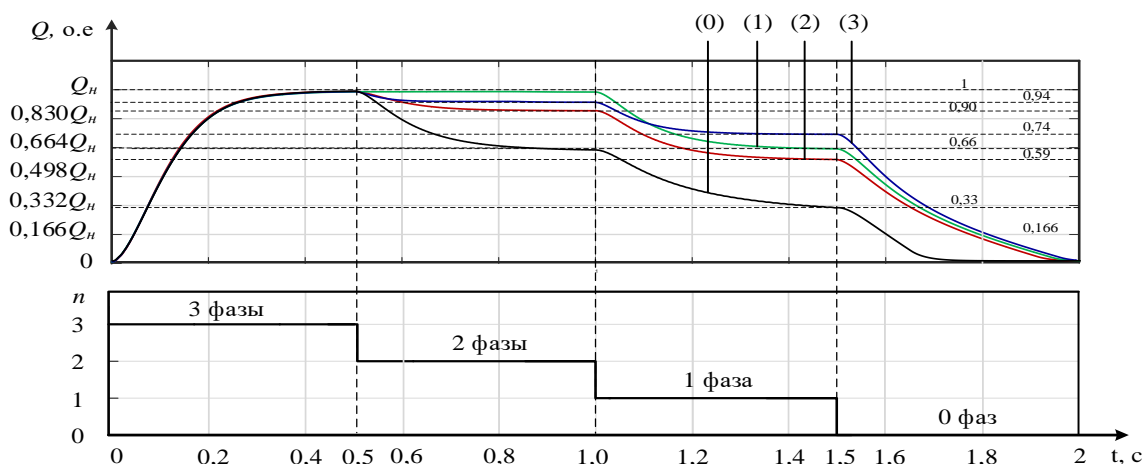


Рис. 5. Расходные характеристики потока жидкости для алгоритмов (0)-(3)

Важным преимуществом ВИД является то, что он обладает тяговой механической характеристикой, характеристикой постоянной мощности. Благодаря тому, что ВИД в модели ТС является тяговым, целесообразно рассмотреть работу в аварийных режимах при совмещенном алгоритме отказоустойчивого управления (3).

На рис. 6 приведены характеристики скорости ТС, перемещения ТС при последовательном отказе фаз ВИД с алгоритмом управления (3).

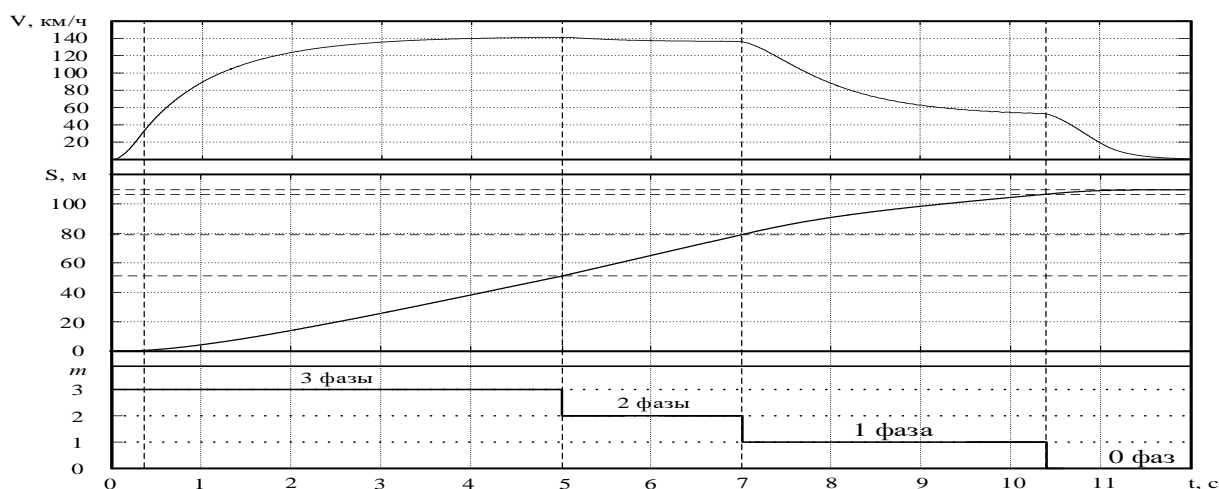


Рис. 6. Характеристики ТС при последовательных отказах фаз электродвигателя с алгоритмом отказоустойчивого управления (3).

Из рис.6. следует, что при отказе одной фазы возможно восстановить заданную скорость ТС вплоть до 95% от начального значения при применении управления трехфазным ВИП с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз и увеличения амплитуд фазных токов. При обрыве второй фазы показано, что значение скорости падает до уровня 43% от начального. Соответственно, при работе ВИП с алгоритмом отказоустойчивого управления возможно сохранить заданное значение скорости и величину перемещения ТС после обрыва одной фазы и частичное значение при обрыве двух фаз.

На рисунке 7 показана блок-схема алгоритма отказоустойчивого управления ТС с ВИД (рис. 7а) и функциональная схема ТС с ВИД (рис.7б).

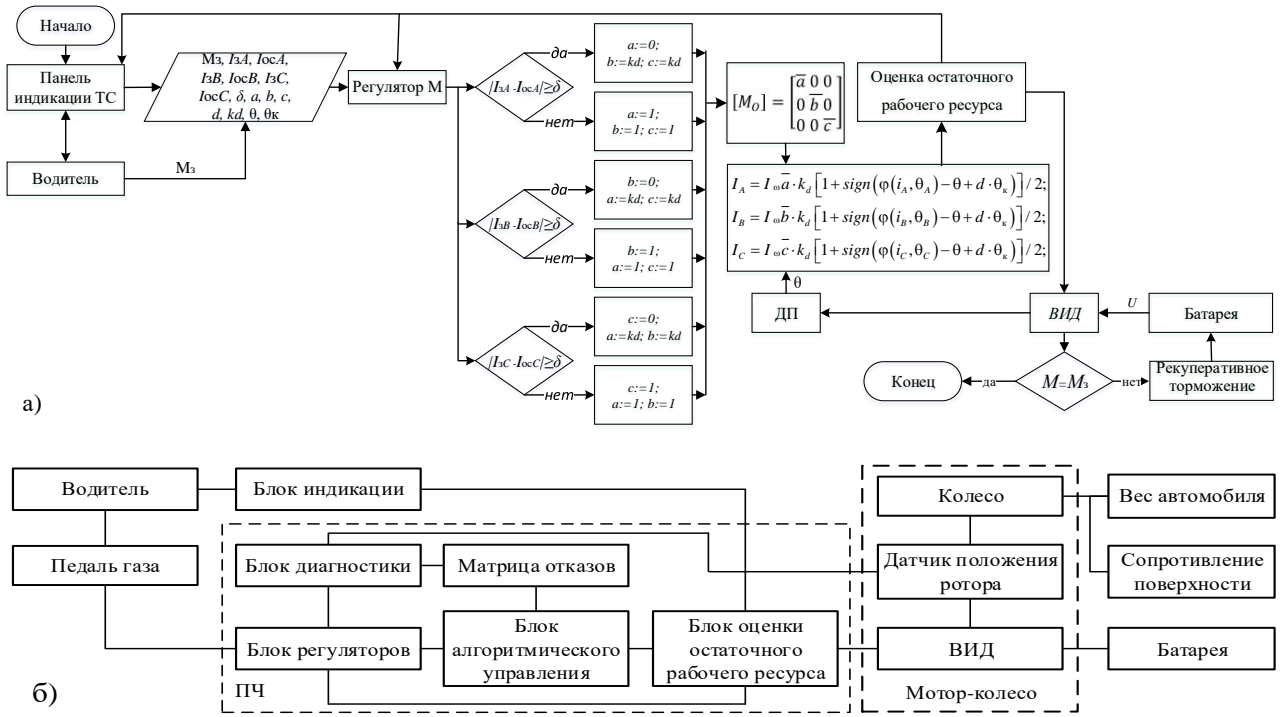


Рис. 7. а) блок схема совмещенного алгоритма в ТС с ВИД б) функциональная схема рассматриваемого ТС с ВИД.

В четвертой главе рассмотрена модель насоса добычи нефти на базе ВИП с бездатчиковым векторным управлением в аварийном режиме работы. Бездатчиковое управление ВИД осуществляет система управления, которая анализирует изменения магнитного потока в фазах двигателя и определяет необходимые моменты коммутации обмоток ВИД, производит регулирование тока в фазных обмотках ВИД, рассчитывает текущую скорость вращения ротора. Величина потокосцепления на полюсах ВИД изменяется во времени, но ее направление соответствует оси поля статора фазы. В аварийном режиме ВИД при обрыве фазы необходимо перенаправить векторы магнитного потока для создания общего магнитного поля, чтобы избежать ошибки при расчете положения и скорости для правильной очередности переключения фаз. Чтобы вывести общий вектор потока статора, вектора потоков фаз преобразуются в стационарной ортогональной двухосной системе координат d-q. На рис. 8 приведены векторные диаграммы потока  $\Phi$  в осях d-q для разных конструкций 5-ти (10/8), 4-х (8/6), 3-х (6/4) фазного ВИД.

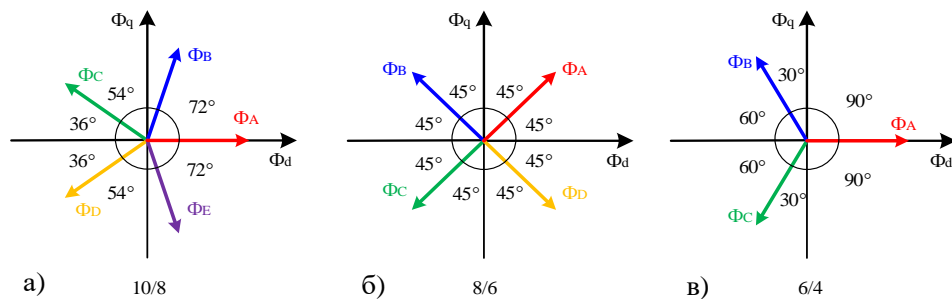


Рис. 8. Векторные диаграммы потока  $\Phi$  в осях d-q для разных конструкций 5-ти (а), 4-х(б), 3-х(в) фазного ВИД

В магнитной системе ВИД с разными амплитудами магнитные потоки будут суммироваться и формировать суммарный магнитный поток, фаза которого зависит от

углового положения ротора ВИД. Разработан алгоритм (4), позволяющий изменять углы векторов потока в соответствии с количеством оставшихся в работе фаз в аварийном режиме. Необходимые углы векторов потока в фазах, в зависимости от числа оставшихся в работе фаз, приведены в таблице 3.

Таблица 3.

X	$\sigma_i$ , град.				
	A	B	C	D	E
5	0°	72°	36°	36°	72°
4	45°	45°	45°	45°	-
3	0°	60°	60°	-	-
2	0°	90°	-	-	-

Где  $b_i$  – бит отказа соответствующей фазы,  $N$  – число фаз ВИД,  $X$  – счетчик состояния ВИД,  $\bar{\Phi}_i$  – вектор потока соответствующей фазы,  $\Phi_d$  и  $\bar{\Phi}_d$  – поперечная и продольная составляющая результирующего вектора суммарного потока в осях  $d$ - $q$ ,  $\sigma_i$  – угол вектора соответствующей фазы (таблица 3),  $\sigma$  – угол вектора  $\Phi_{\text{общ}}$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\Phi}_d = \sum_{i=1}^X b_i \cdot \bar{\Phi}_i \cdot \cos(\sigma_i); \\ \bar{\Phi}_q = \sum_{i=1}^X b_i \cdot \bar{\Phi}_i \cdot \sin(\sigma_i); \\ X = \sum_{i=1}^N b_i; \\ \Phi_{\text{общ}} = \sqrt{\Phi_d^2 + \Phi_q^2}; \\ \sigma = \arctan\left(\frac{\Phi_d}{\Phi_q}\right). \end{array} \right. \quad (4)$$

Рассмотрим работу четырехфазного ВИД топологии 8/6 в аварийном режиме с реализацией алгоритма переключения (4). Формирование векторов потока в нормальном рабочем режиме работы обеспечивает поочередную коммутацию полюсов фаз электродвигателя с рабочим углом  $\pi/4$  (5). При этом  $X=4$ , ( $b_A = 1, b_B = 1, b_C = 1, b_D = 1$ ). Принято, что вектор фазы А ориентирован в одном направлении с осью  $d$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_d = \Phi_A \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_B \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_C \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_D \cos\left(\frac{\pi}{4}\right); \\ \Phi_q = \Phi_A \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + \Phi_B \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_C \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_D \sin\left(\frac{\pi}{4}\right). \end{array} \right. \quad (5)$$

В аварийном режиме при отказе одной фазы необходимо изменить углы векторов потока на рабочий угол  $\pi/3$  в соответствии с таблицей 3, чтобы избежать ошибки при расчете положения и скорости для правильной очередности переключения фаз (6). При этом  $X=3$ , ( $b_A = 1, b_B = 1, b_C = 1, b_D = 0$ ) тогда:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_d = \Phi_A - \Phi_B \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - \Phi_C \cos\left(\frac{\pi}{3}\right); \\ \Phi_q = \Phi_A + \Phi_B \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) - \Phi_C \sin\left(\frac{\pi}{3}\right). \end{array} \right. \quad (6)$$

В нормальном режиме работы формируется четыре матрицы коммутации полюсов фаз, по аналогии с ранее рассмотренными матрицами отказов. В аварийном режиме при отказе одной фазы двигатель теряет два полюса и переходит в трехфазный режим с тремя матрицами коммутации фаз.

Ниже приведены зависимости частоты вращения ( $\omega$ ), объемного расхода жидкости ( $Q$ ) и токов ( $im$ ) для случая аварийного режима штатной четырехфазной модели без переключения структуры бездатчикового управления (рис. 8), в случае работы с разработанным алгоритмом бездатчикового управления (4) в аварийном режиме работы (рис. 9), при работе с алгоритмом бездатчикового управления (4) и

алгоритма компенсации токов (1), где  $m$  – число функционирующих фаз двигателя (рис. 10).

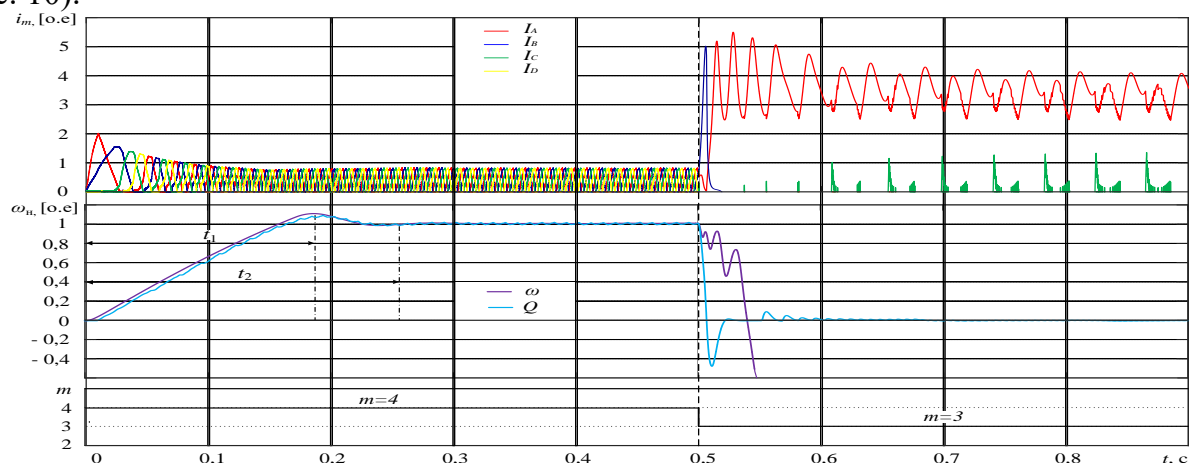


Рис. 9. Зависимость токов фаз ( $i_m$ ) угловой частоты вращения ( $\omega$ ), объемного расхода жидкости ( $Q$ ) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД без переключения структуры управления

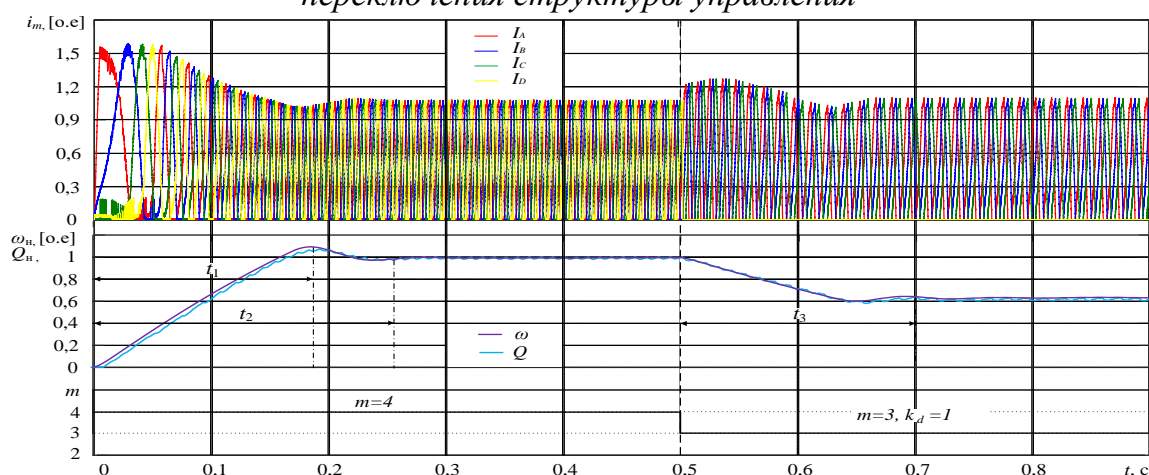


Рис. 10. Зависимость токов фаз ( $i_m$ ), угловой частоты вращения ( $\omega$ ), объемного расхода жидкости ( $Q$ ) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД с алгоритмом бездатчикового управления (4)

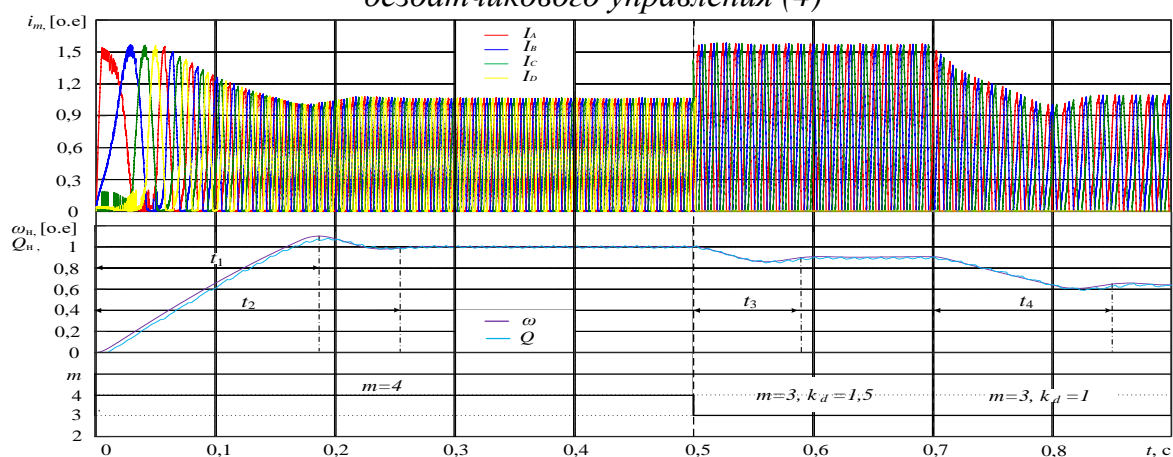


Рис. 11. Зависимость токов фаз ( $i_m$ ), угловой частоты вращения ( $\omega$ ), объемного расхода жидкости ( $Q$ ) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД с алгоритмом бездатчикового управления (4) и алгоритмом компенсации токов (1)



Показано, что при работе без переключения структуры управления (рис. 9) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с.) электропривод насоса прекращает функционировать и реагировать на управление, токи в отдельных оставшихся подключенных к питанию фазах возрастают в 5 раз от номинального уровня. Время достижения первого максимума при пуске  $t_1=0,19$  с. Время пуска до установившегося значения  $t_2=0,265$  с. При использовании алгоритма отказоустойчивого векторного бездатчикового управления (4) (рис. 10) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с.) электродвигатель насоса продолжает функционировать с потерей мощности до уровня 0,62 от номинального значения. При этом значения токов в оставшихся в работе фазах на время переходного процесса возрастают на 25 %, не превышая пусковых значений токов. Время переходного процесса при переключении структуры управления  $t_3=0,2$  с. При использовании алгоритма отказоустойчивого векторного бездатчикового управления (4) совместно с алгоритмом компенсации токов в оставшихся функционирующих фазах (1) (рис. 11) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с.) электродвигатель насоса продолжает свою работу в трехфазном режиме. На участке (0,5–0,7 с) показана возможность работы с алгоритмом компенсации токов в оставшихся в работе фазах на уровне мощности 0,89 от заданного номинального уровня, значение токов в оставшихся в работе фазах повышается на  $k_d=1,5$ . Время переходного процесса при переключении структуры управления на работу с алгоритмом компенсации токов  $t_3=0,09$  с.

**В пятой главе** рассмотрены технические решения по построению отказоустойчивого ВИП. Разработано решение по построению ВИП со свойством живучести [8]. Рассмотрен одноконтурный импульсный регулятор напряжения для ВИД [9, 10]. Спроектирован стенд для исследований аварийных режимов работы ВИП [11]. Показано построение гибридного транспортного средства [13].

**В заключении** подведены итоги исследований, сформулированы основные выводы и результаты.

**В приложении А, Б, В** представлены результаты патентного исследования по рассматриваемой теме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные научные исследования представлены следующими новыми результатами:

1. Разработаны математическая и имитационная модели трехфазного вентильно-индукторного двигателя, позволяющие исследовать рабочие и аварийные режимы электропривода как в односекционном, так и двухсекционном исполнении. Разработаны математическая и имитационная модели электроцентробежного насоса добычи нефти, транспортного средства на базе вентильно-индукторного электродвигателя, позволяющие исследовать работу погружного насоса или транспортного средства в аварийных и неполнофазных рабочих режимах. Рассмотрен режим пуска на двух фазах.

2. Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления трехфазным вентильно-индукторным электроприводом позволяющие базирясь на матрице отказов обеспечить отказоустойчивость и живучесть при одиночных и множественных отказах одной или нескольких фаз электродвигателя. Показано, что трехфазный вентильно-индукторный двигатель в аварийном двухфазном режиме обеспечивает функционирование с ограниченной работоспособностью, проявляя свойство исходной отказоустойчивости с поддержанием частоты вращения на уровне 66%. Применение разработанных алгоритмов отказоустойчивого управления в аварийном двухфазном

режиме трехфазного вентильно-индукторного электропривода с увеличением амплитуд фазных токов и изменением угла перекрытия фаз, а также совмещенного алгоритма позволяет поддержать частоту вращения на уровне 85–90% от значения до момента возникновения аварии. В однофазном режиме 33-66% в зависимости от алгоритма управления. Показано, что при работе с разработанным алгоритмом отказоустойчивого управления с увеличением амплитуд фазных токов реализуется возможность полного восстановления работоспособности установки электроцентробежного насоса с вентильно-индукторным электродвигателем. Показано, что в транспортном средстве при отказе одной фазы возможно восстановить заданную скорость транспортного средства вплоть до 95% от начального значения при применении алгоритма управления трехфазным вентильно-индукторным двигателем с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз и увеличения амплитуд фазных токов. При обрыве второй фазы показано, что значение скорости падает до уровня 43% от начального.

3. Разработана математическая и имитационная модели бездатчикового четырехфазного вентильно-индукторного электропривода насосного агрегата в аварийных и неполнофазных режимах работы. Показано, что при использовании отказоустойчивого управления с переключением структуры и смещением векторов потока после обрыва одной фазы и перехода в 3-х фазный режим работы 4-х фазного вентильно-индукторного двигателя провал частоты вращения составляет 38% от номинального уровня, и двигатель продолжает устойчивое функционирование в аварийном режиме работы. При совместном использовании алгоритма бездатчикового управления и алгоритма компенсации момента за счет увеличения амплитуды фазных токов после отказа типа «обрыв фазы» электродвигателя работоспособность можно кратковременно восстановить до уровня 89 % от номинального заданного значения частоты вращения вала электродвигателя с минимальным снижением требуемого уровня объемного расхода жидкости, с дальнейшим переходом на длительный режим 62 % уровня от номинального без использования алгоритма компенсации токов

4. Разработаны технические решения по построению вентильно-индукторного двигателя с отказоустойчивым управлением при однократных и множественных отказах с обеспечением реализации в нем отказоустойчивых алгоритмов восстановления работоспособности.

### **Основные результаты, опубликованные в изданиях, индексируемых базой данных Scopus/WoS:**

1. Odnokopylov G.I., **Rozaev I.A.**: Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive \ \ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2014 - Vol. 66 - №. 1. — P. 1-7
2. Odnokopylov G.I., **Rozaev I.A.** Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes \ \ 2015 International Siberian conference on control and communications, SIBCON 2015 – proceedings. Издательство: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.- 2015. — P. 7147192.
3. Odnokopylov G.I., **Rozaev I.A.** Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes \ \ Proceedings of IFOST-2016 11th International Forum on Strategic Technology. 2016 Издательство: Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск). — P. 140-144.
4. Odnokopylov G.I., **Rozaev I.A.**, Bukreev V.G. Research of fault-tolerant switched-reluctance motor of electrical oil pump [Electronic resources] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. — 2019. — V. 330. — № 10. — P. 69-81.

5. Odnokopylov G.I., **Rozaev I.A.** Algorithms of fault-tolerant sensorless vector control of switched-reluctance motor in electrical oil pump [Electronic resources] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. — 2020. — V. 331. — № 5. — P. 208-218.

#### **Основные результаты, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:**

6. **Розаев И.А.**, Однокопылов Г.И. Моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 323 - №. 4. - С. 138-143

7. **Розаев И.А.**, Однокопылов Г.И. Восстановление работоспособности вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2014 - №. 4. - С. 181-184

#### **Основные результаты опубликованные в патентах РФ:**

8. Патент на ПМ № 128409 (RU), H02H 7/09, H02H 7/12, H02P 6/12, H02P 6 / 16. Вентильно-индукторный электропривод со свойством живучести / **И.А. Розаев**, Г.И., Однокопылов, В.Г. Букреев. – №2012153519; Заявл. 11.12.12; Оpubл. 20.05.13 Бюл. № 14.

9. Патент на ПМ № 128410 (RU), H02H 7/09, H02H 7/122, H02M 7/5395, H02P 27 / 08. Однофазный полумостовой инвертор для электродвигателя переменного тока с контролем состояния / **И.А.Розаев.**, Г.И. Однокопылов, А.Д.Брагин,. -№ 2012153510; Заявл. 11.12.2012; Оpubл. 20.05.2013 Бюл. № 14.

10. Патент на ПМ № 128420 (RU), H02H 7/09, H02H 7/10, H02P 25/08. Однотактный импульсный регулятор напряжения для вентильно-индукторного электродвигателя / **И.А. Розаев.**, Однокопылов Г.И, А.Д. Брагин. – № 2012153524; Заявл. 11.12.2012; Оpubл. 20.05.2013 Бюл. № 14.

11. Патент на ПМ № 136184 (RU), G01R 31/02. Установка для исследований аварийных режимов работы вентильного двигателя / **И.А. Розаев**, Г.И.Однокопылов, А.Д. Брагин. – № 2013138092; Заявл. 14.08.2013; Оpubл. 27.12.2013 Бюл. № 36.

12. Патент на ПМ № 136185 (RU), G01R 31/02. Установка для исследований аварийных режимов работы вентильно-индукторного электропривода / **И.А. Розаев**, Г.И. Однокопылов., – № 2013138859; Заявл. 20.08.2013; Оpubл. 27.12.2013 Бюл. № 36.

13. Патент РФ на изобретение № 2657707, МПК В60К 6/28 (2007.10), В60L 11/00 (2006.01), H02К 21/00 (2006.01). Гибридное транспортное средство с вентильным двигателем. / **И.А. Розаев.**, Г.И. Однокопылов., Е.П. Сенькив, Дементьев Ю.Н. Заявл. от 20.02.2017, Оpubл. 14.06.2018 Бюл. № 17

#### **Основные результаты опубликованные в изданиях входящих в РИНЦ:**

14. **Розаев И.А.**, Однокопылов Г.И., Брагин А.Д. Моделирование вентильного двигателя в неполнофазных режимах работы // Международный научно-исследовательский журнал. - 2014 - №. 8-1(27). - С. 48-51

15. **Розаев И.А.**, Однокопылов Г.И. Отказоустойчивый вентильно-индукторный электропривод // Новейшие энергетические установки в промышленности и на транспорте. - 2014 - №. 1. - С. 39-42

16. **Розаев И.А.**, Однокопылов Г.И. Принципы обеспечения отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом с обеспечением свойства живучести // Академический журнал Западной Сибири. - 2013 - Т. 9 - №. 6. - С. 46-47

17. **Розаев И.А.** Алгоритмическое обеспечение отказоустойчивого управления двухсекционного вентильно-индукторного электропривода // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодежного форума, Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: Изд-во «Рауш\_мбХ», 2014 - Т. 2 - С. 75-79

18. **Розаев И.А.** Диагностика двухсекционного вентильно-индукторного электропривода на

основе анализа фазных токов // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодёжного форума, Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: Изд-во «Рауш\_мбХ», 2014 - Т. 2 - С. 79-82

19. **Розаев И.А.** Математическое моделирование вентильно-индукторного электродвигателя в аварийных режимах работы [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 259-260.

20. **Розаев И.А.** Математическое моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник XI Международной конференции студентов и молодых ученых, Томск, 22-25 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - С. 811-813.

21. **Розаев И.А., Брагин А.Д.** Fault-tolerant electric drives of industrial mechanisms // Интеллектуальные энергосистемы: материалы I Международного молодежного форума: в 2 т., Томск, 21-25 Октября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - Т. 2 - С. 210-213

22. **Розаев И.А.** Моделирование многосекционного вентильно-индукторного электропривода // Интеллектуальные энергосистемы: материалы I Международного молодежного форума: в 2 т., Томск, 21-25 Октября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - Т. 2 - С. 214-218

23. **Розаев И.А., Однокопылов Г.И.** Моделирование многосекционного вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VI Международной научно-технической конференции, Томск, 9-11 Октября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 229-235

24. **Розаев И.А., Зарубин Н.А.,** Восстановление производительности карусельной упаковочной машины при отказе штуцеров // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодежного форума: в 2 т., Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: РауШ мбх, 2014 - Т. 2 - С. 57-60

25. **Rozaev I.A.** Failure-free control of switched reluctance motor // Язык и мировая культура: взгляд молодых исследователей: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции: (часть 3), Томск, 24-28 Апреля 2013. - Томск: Изд-во ТПУ, 2013 - С. 85-89

26. **Розаев И.А.** Математическое моделирование многосекционного вентильно-индукторного электропривода // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 21-24 Ноября 2013. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013 - С. 82-86

27. **Розаев И.А.** Вентильно-индукторный электропривод со свойством живучести // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: материалы отраслевой НТК, Северск, 27-31 Мая 2013. - Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2013 - С. 75

28. **Розаев И.А., Однокопылов Г.И.** Исследование живучести трехфазного вентильно-индукторного электродвигателя // Электронные и электромеханические системы и устройства: тезисы докладов XIX научно-технической конференции, Томск, 16-17 Апреля 2015. - Томск: НПЦ "Полус", 2015 - С. 151-153

29. **Розаев И.А., Однокопылов Г.И.** Отказоустойчивое управления вентильно-индукторным электроприводом в аварийных режимах работы // XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению SIBCON-2015, Омск, 21-23 Мая 2015. С 203-206.

30. **Розаев И.А., Момот П.М.** Электропривод буровых установок // Электроэнергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово, 2018 – С. 327.1-327.5

31. **Розаев И.А., Паюк Л.А., Воронина Н.А.** Применение колебательно-вращательного режима работы в виброприводе // Вестник ПГУ. Серия энергетическая / Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова (ПГУ) . — 2020 . — № 4 . — С. 314-323