

На правах рукописи

Королёв Николай Александрович



**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С
АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПО
ЧАСТОТНЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ СПЕКТРА ТОКА**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт - Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Козярук Анатолий Евтихиевич

Официальные оппоненты

Саушев Александр Васильевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», кафедра электропривода и электрооборудования береговых установок, заведующий кафедрой;

Поляков Николай Александрович

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет систем управления и робототехники, доцент.

Ведущая организация – Акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 28 апреля 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте: www.spmi.ru

Автореферат разослан 28 февраля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из основных задач государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики», утвержденной на 2030 г., является модернизация, повышение надежности функционирования и переход электроэнергетики на новый технологический уровень. Переход к технологиям «Индустрии 4.0» реализуется в условиях роста потребителей электроэнергии, а также тенденции увеличения внедрения асинхронного электропривода в промышленности.

Электротехнические комплексы (ЭТК) с автоматизированным электроприводом являются сегодня ключевым звеном в технологическом цикле промышленного предприятия, определяющим количество, качество и себестоимость продукции. Широкое применение асинхронного двигателя (АД) в электроприводе обосновано его энергетическими, механическими и технико-экономическими показателями, при этом его доля применения на промышленных предприятиях составляет до 85% от всех электроприводов. Оптимальность энергетических и механических характеристик асинхронного электропривода достигается за счет различных алгоритмов систем управления в соответствии с предъявляемыми к нему требованиями. Однако воздействия различных типов (тепловое, электрическое, механическое и др.), определяемые условиями эксплуатации, приводят к ускоренному износу с появлением дефектов, а также нарушению требуемых показателей регулирования, достигаемых при проектировании и пусконаладочных работах. Отсутствие унифицированных и нормированных методик оценки технического состояния, вида и уровня дефектов приводит к ускоренному износу отдельных узлов автоматизированного электропривода в целом, снижению механических и энергетических показателей с последующим аварийным отключением.

В связи с этим, вопросы разработки аппаратно-программных средств идентификации дефектов и оценки технического состояния

автоматизированного электропривода, обеспечения его энергоэффективности и работоспособности являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования

Изучению общих вопросов оптимального управления алгоритмами скалярного и векторного управления автоматизированного привода посвящены труды многих отечественных ученых: Виноградова А.Б., Шрейнера Р.Т., Браславского И.Я., Лезнова Б.С., Пронина М.В., Анучина А.С. и др. Саушевым А.В. описана область работоспособности электротехнических систем и обоснован метод определения запаса работоспособности с использованием электрических и механических аналогий. Петроченковым А.Б. описаны средства и методы повышения функционирования электротехнических комплексов (ЭТК). Работы Вейнберга К.Б., Thomson W.T. посвящены спектральному анализу тока АД при дефектах. Исследования Cardoso A.J. посвящены девиации формы годографа тока АД в зависимости от вида и уровня дефектов.

По производству и исследованиям средств контроля, диагностики, мониторинга, методов обработки сигналов следует выделить компании: National Instruments (США), Bruel&Kjaer (Дания), Schneider Electric (Франция), Ono-Sokki (Япония).

Российскими представителями в данной области научных и технических изысканий являются такие компании как: ИТЦ «Оргтехдиагноз» (г. Москва), ООО «Диамех» (г. Москва), АО «ВАСТ» (г. Санкт-Петербург), ООО «Интотес» (г. Нижний Новгород), ООО «Вибро-Центр» (г. Пермь).

Отечественный и зарубежный опыт показывают, что внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов в эффективности использования ЭТК. Однако, несмотря на многочисленные исследования, направленные на развитие общей теории технической диагностики и экспериментальных методик идентификации дефектов, алгоритмов управления, разработку аппаратно-программных комплексов поддержания работоспособности автоматизированного электропривода (АЭП), отсутствуют унифицированные и нормированные методики оценки

технического состояния АЭП с выявлением вида и уровня дефекта АД, что обуславливает необходимость их разработки.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности:

Диссертация соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы:

п. 4 Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Объект исследования – электротехнические комплексы предприятий с автоматизированным электроприводом и асинхронным двигателем со скалярной и векторной системами управления.

Предмет исследования – оценка технического состояния автоматизированного электропривода по частотным составляющим спектра потребляемого тока асинхронного двигателя.

Цель работы – разработка методик и алгоритмов оценки технического состояния автоматизированного электропривода при дефектах асинхронного двигателя с учетом критериев работоспособности и энергоэффективности.

Идея работы – анализ частотных составляющих спектра потребляемого тока асинхронного двигателя может обеспечить идентификацию вида и уровня дефекта с непрерывной оценкой его технического состояния, а также определение энергетической и механической эффективности автоматизированного электропривода.

Основные задачи исследования:

1. Выбор и обоснование метода идентификации неисправностей асинхронного двигателя в автоматизированном электроприводе с возможностью оценки вида и уровня дефектов.

2. Исследование влияния вида и уровня дефектов на систему управления автоматизированного электропривода с различными алгоритмами управления в части энергетических и механических характеристик.

3. Разработка оценочных критериев технического состояния с выделением пороговых значений, учитывающих работоспособность и энергоэффективность автоматизированного электропривода.

4. Разработка структуры, алгоритмов и методики оценки технического состояния автоматизированного электропривода.

5. Численное и имитационное моделирование автоматизированного электропривода с интеграцией системы оценки технического состояния в систему управления электроприводом.

6. Экспериментальные исследования автоматизированного электропривода с системой оценки технического состояния при дефектах асинхронного двигателя.

Научная новизна работы:

1. Выявлены пороговые значения амплитуд гармонических составляющих в спектре потребляемого тока асинхронного двигателя, характеризующие вид и уровень дефектов автоматизированного электропривода со скалярными или векторными алгоритмами управления.

2. Найдены зависимости потребляемой активной мощности, частоты вращения ротора и электромагнитного момента от вида и уровня дефекта с формированием оценочных критериев.

3. Разработаны алгоритмы оценки технического состояния автоматизированного электропривода по амплитудным значениям гармоник в спектре потребляемого тока АД, отличающиеся идентификацией вида и уровня дефектов элементов узла, узла и устройства.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика по определению пороговых амплитудных значений гармонических составляющих в спектре тока, потребляемого асинхронным двигателем в составе автоматизированного электропривода, позволяющая идентифицировать вид и уровень дефекта.

2. Выделены и обоснованы критерии энергоэффективности и работоспособности автоматизированного электропривода относительно технического состояния.

3. Разработана методика оценки технического состояния автоматизированного электропривода по частотным составляющим тока асинхронного двигателя.

Методология и методы исследования

Результаты диссертационной работы были получены с использованием теории обобщенной электрической машины; теории электропривода; методов решения дифференциальных уравнений; методов численного и имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink; экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Пороговые значения амплитуд гармонических составляющих в спектре потребляемого тока асинхронного двигателя, характеризующие вид и уровень дефекта в автоматизированном электроприводе, определяются при учете уставок реализованных защит по току и напряжению, алгоритмов управления, а также требований к качеству и точности регулирования.

2. Амплитудные значения частотных составляющих спектра потребляемого тока асинхронного двигателя позволяют оценить техническое состояние автоматизированного электропривода на основе отклонений сигналов, дефектов элементов в узле, неисправностей узлов и устройств в его составе с оценкой критериев энергоэффективности и работоспособности.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена методами численного и имитационного моделирования, результатами экспериментальных исследований на лабораторном стенде, разработанном в Учебно-научном центре цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета, а также на испытательном стенде АО «Приборостроительный завод «ВИБРАТОР», что подтверждено справкой о внедрении результатов.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на всероссийских и международных конференциях:

1. Международный семинар «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019»

24-25 апреля 2019 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет;

2. Международная конференция «International Scientific Electric Power Conference «ISEPC-2019» 23-24 мая 2019 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

3. Международная конференция «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering «EECE-2019» 19-20 ноября 2019 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

4. 74-ая Международная молодежная конференция «Нефть и газ 2020», 28 сентября – 02 октября 2020 г., г. Москва, РГУ Нефти и газа им. Губкина И.М.

Личный вклад автора

В рамках исследования автором были сформулированы цели и задачи исследования, выполнен обзор зарубежной и отечественной научной литературы, проведен анализ существующих методов идентификации дефектов и оценки технического состояния. Сформулированы и доказаны научные положения. Разработана методика определения пороговых значений частотных составляющих в спектре тока, потребляемого асинхронным двигателем, позволяющие оценить техническое состояние автоматизированного электропривода с выявлением вида и уровня дефекта и оценкой энергоэффективности и работоспособности. Основные результаты диссертационной работы изложены в подготовленных научных публикациях и представлены на конференциях.

Публикации по результатам исследования

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 16 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 8 статьях – в

изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science. Получены 6 патентов РФ, в том числе 3 патента на изобретение, 1 патент на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программного продукта для ЭВМ.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Диссертация содержит 169 страниц машинописного текста, 87 рисунков, 23 таблицы, список литературы из 120 наименований и 5 приложений.

Благодарность

Автор выражает благодарность кандидату технических наук, доценту, директору Учебно-научного центра цифровых технологий Горного университета Юрию Леонидовичу Жуковскому за помощь в подготовке и проведении научных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ выбранных структур и алгоритмов управления АЭП средней и малой мощности, анализ средств, методов идентификации неисправностей и подходов к оценке технического состояния электропривода. На основе анализа выделены проблемы эксплуатации АЭП при дефектах двигателя, заключающиеся в:

- повышенном энергопотреблении до аварийной остановки;
- нарушении качества и точности регулирования АЭП;
- повышенном износе сопряженного механического

оборудования.

Сформулированы проблемы нарушения устойчивости, энергоэффективности и работоспособности АЭП:

- отсутствие унифицированных и нормированных методик идентификации дефектов АЭП по виду и уровню дефекта;

- отсутствие оценочных критериев сложных многокомпонентных ЭТК;

- электромеханическая совместимость ЭП.

Во второй главе выделены основные дефекты i -ых узлов АД ($i = \overline{1, n}$; n – количество диагностируемых узлов), с повреждениями отдельных j -ых элементов внутри узлов ($j = \overline{1, m}$; m – количество неисправностей в узле):

- статор (асимметрия фазных токов, межвитковые замыкания в обмотке статора; однофазное и междуфазное короткие замыкания АД);

- ротор (обрыв стержней ротора; ослабление соединительной муфты; асимметрия ротора);

- воздушный зазор (статический, динамический и комбинированный эксцентриситет);

- подшипники (тела качения, внутренняя дорожка, внешняя дорожка).

По выявленным значениям частот f_{dij} и амплитуд I_{dij} , характерных для дефектов, гармонического сигнала тока определяется как (1). В соответствии с этим разработан алгоритм идентификации дефектов в сигнале тока статора АД (рисунок 1).

$$i_{dij}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{dij}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{dij} \cdot t) \right], \quad (1)$$

где I_{dij} – амплитуда гармонического сигнала характерного дефекту, А; k_{mjk} – k -ый коэффициент модуляции при $f_{dij} \in k_{m1k}$, $k = \overline{1, l}$; l – определяется из условия $20 \lg(I_{d4j}/k_{mjk}) \leq -80$ Дб.

Гармонический состав тока статора АД с учетом $i_{dij}(t)$ (1), примет вид (2) с характерными искажениями в форме, что наблюдается на примере межвитковых КЗ (рисунок 2).

$$i_{ст}(t) = i_1(t) + i_{dij}(t) = I_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{dij}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{dij} \cdot t) \right], \quad (2)$$

где I_1 – амплитуда основной гармоники тока статора, А; f_1 – частота основной гармоники тока статора, Гц, (50 Гц); ω_1 – частота вращения основной гармоники тока статора, рад/с.

Гармонический состав тока статора с учетом гармонического составом тока на выходе АИН и наличия дефектов, определяется ка (3):

$$i_{ст}(t) = i_{\phi}(t) + i_{dij}(t) = I_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t + \varphi) + \sum_{m=1}^{m=\infty} I_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) t + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{dij}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{dij} \cdot t) \right], \quad (3)$$

где I_n – амплитудные значения гармоник тока А, кратные основной частоте вращения $\omega_1 = 2\pi f_1$, рад/с; $n = k \cdot 6 \pm 1 = 1, 5, 7, 11, 13 \dots$ – номера гармоник; I_m – амплитуды гармоник тока статора А, кратные несущей частоте $\omega_H = 2\pi f_H$, рад/с; f_1, f_H – основная и несущая частоты, Гц; I_{nm} – амплитуды комбинационных гармоник тока статора, А, вызванных взаимодействием основной и несущей частот; $m = 1, 2, 3 \dots$ и $v = 1, 2, 4, 5, 7 \dots$ – кратности несущей ω_H и основной ω_1 частот вращения.

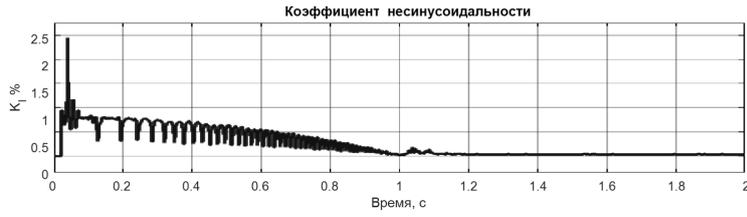
С учетом полигармонического состава тока искажения необходимо учитывать в общем коэффициенте искажения тока, определяющем энергоэффективность АЭП от технического состояния (4):

$$K_I = \frac{\sqrt{(K_{I1A} + K_{I2A} + K_{I3A})^2 + (K_{I1B} + K_{I2B} + K_{I3B})^2 + (K_{I1C} + K_{I2C} + K_{I3C})^2}}{3}, \quad (4)$$

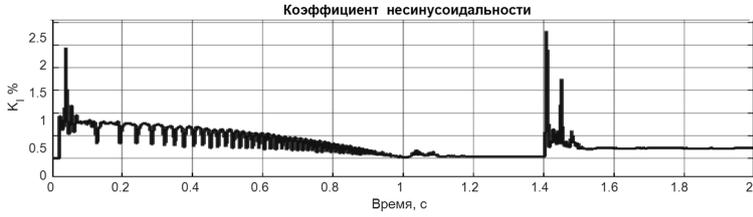
где $K_{I1\phi}$ – коэффициент искажений тока кратных основной гармонике, о.е.; $K_{I2\phi}$ – коэффициент искажений тока кратных несущей гармонике, о.е.; $K_{I3\phi}$ – коэффициент искажений тока, вносимых дефектами АД, о.е., ϕ – фазы А, В, С.

Коэффициенты $K_{I1\phi}$ и $K_{I2\phi}$ определяют искажения, вносимые инвертором (1-2,5%). Вид дефекта и уровень определяет интенсивность роста коэффициента искажения (рисунок 3) и характеризует дополнительные потери мощности (таблица 1).

Результатом взаимодействия полигармонических составов тока статора (3) с потокосцеплением ротора являются пульсирующие электромагнитные моменты, образованные дефектами электрической или механической частей асинхронного двигателя.



а



б

Рисунок 3 – Изменения коэффициента искажения синусоидальности тока:
 а – исправного АД; б – с появлением дефекта АД (пуск при $t=0-1,2$ с;
 проявление дефекта в момент $t=1,4$ с)

Таблица 1 – Потери активной мощности при степени дефекта

Потери, кВт	Степень дефекта, %				
	5	10	15	20	25
1	2	3	4	5	6
p_{d1j}	1,00	6,30	25,30	57,00	101,00
p_{d2j}	0,00	0,50	2,10	4,70	8,40
p_{d3j}	0,10	0,10	3,40	3,40	13,60
p_{d4j}	0,70	4,80	19,10	42,90	76,00

Примечание: p_{d1j} – потери при дефектах в статоре; p_{d2j} – потери при дефектах в подшипниках; p_{d3j} – потери при эксцентриситете; p_{d4j} – потери при дефектах в роторе.

Результирующий электромагнитный момент (5) можно представить в виде:

$$M_e = M_{(n)} + M_{(qp)} + M_{(di)} = \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{st(n)} \psi_{r(n)} \sin(\theta) + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} I_{st(q)} \psi_{r(p)} \sin(\theta_{qp}) + \sum_{i=1}^{i=\infty} I_{st(di)} \psi_{r(di)} \sin(\theta_{di}), \quad (5)$$

где $M_{(n)}$ – основной электромагнитный момент, Н·м; $M_{(qp)}$, $M_{(di)}$ – знакопеременные составляющие электромагнитного момента, создаваемые в результате взаимодействия n -ми гармониками тока

статора и потокосцепления ротора, di -ми гармониками тока статора и потокосцепления ротора, q -ой гармоники тока статора и p -ой гармоники потокосцепления ротора, Н·м; $I_{st(n)}$, $I_{st(q)}$, $I_{st(di)}$, $\psi_{r(n)}$, $\psi_{r(p)}$, $\psi_{r(di)}$ – гармонические составляющие тока статора и потокосцепления ротора, кратные основной, несущей и дефектным гармоникам, А, Вб; θ_{qp} , θ_{di} – углы между соответствующими гармониками тока статора и потокосцепления ротора, рад.

Коэффициент пульсации электромагнитного момента при этом необходимо учитывать как суммарный (6), определяющий работоспособность АЭП от технического состояния (рисунок 4 и таблица 2) при скалярных и векторных алгоритмах управления.

$$\Sigma K_{Me} = \sqrt{(\sum_{n=2}^{n=\infty} M_{(n)}^2 + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} M_{(qp)}^2) / M_{av} + \sqrt{\sum_{i=2}^{i=\infty} M_{(di)}^2} / M_{av} = K_{Me(n)} + K_{Me}^* \quad (6)$$

где M_{av} – среднее значение электромагнитного момента асинхронного двигателя, Н·м; $K_{Me(n)}$ – коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый типом и структурой силового преобразователя частоты, о.е.; K_{Me}^* – коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый видом и уровнем дефекта АД и механической части электропривода, о.е.

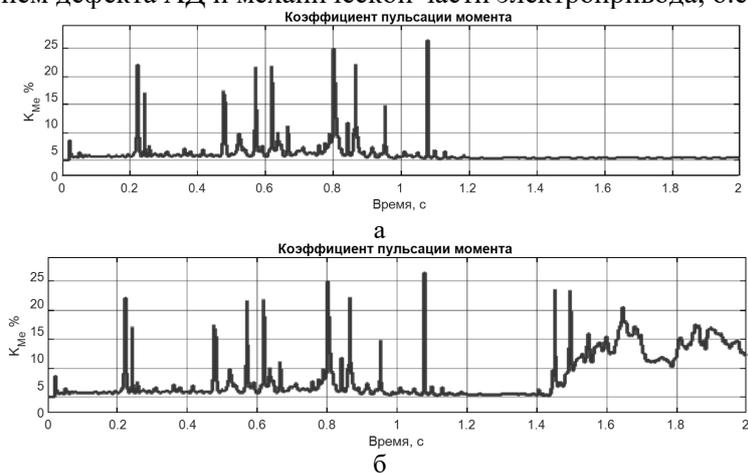


Рисунок 4 – Изменения коэффициента пульсаций электромагнитного момента: а – исправного АД; б – с появлением дефекта АД (пуск при $t=0,2$ с; проявление дефекта в момент $t=1,4$ с)

Таблица 2 – Суммарный коэффициент пульсаций при степени дефекта

Система управления	Дефект	ΣK_{Me} при степени дефекта, %					
		0	5	10	15	20	25
1	2	3	4	5	6	7	8
Замкнутая по скорости ССУ	МЗ	5,0	5,6	6,3	11,3	27,2	32,4
	СР		7	9,5	12,1	15,7	17,4
	ИП		6,1	8,1	10,4	11,8	12,6
	КЭ		6,2	8,3	9,8	10,1	11,7
Замкнутая по скорости ВСУ	МЗ	8,2	8,6	9,3	14,3	30,2	35,4
	СР		10	12,5	15,1	18,7	20,4
	ИП		9,1	11,1	13,4	14,8	15,6
	КЭ		9,2	11,3	12,8	13,1	14,7

Примечание: МЗ – межвитковые замыкания обмотки статора; СР – обрыв стержней ротора; ИП – износ подшипников; КЭ – комбинированный эксцентриситет.

В третьей главе определены пороговые значения амплитуд частотных составляющих (рисунок 5, таблица 3), в спектре потребляемого асинхронным двигателем тока, соответствующие дефектам статора, ротора, подшипникам и искажению магнитного поля в воздушном зазоре, с учетом:

1. Реализованных защит по току и напряжению (рисунок 6):

- Защита от перегрузки или тепловая защита (*Over load*) (7):

$$I_{\text{аин_ном}} < I_{\text{аин}} < I_{\text{аин_max}}, \text{ при } t > t_{\text{пред}} = \text{const.} \quad (7)$$

- Максимально-токовая защита (*Over current*) (8):

$$I_{\text{аин}} > I_{\text{аин_max}}, \quad (8)$$

где $I_{\text{аин_ном}}$, $I_{\text{аин_max}}$ – номинальное и максимальное амплитудное значение тока на выходе инвертора, А; $t_{\text{пред}}$ – выдержка по времени, с.

- Защита от повышенного напряжения в звене постоянного тока (*Over voltage*) (9):

$$U_{dc} > U_{dc_max} = 1.2 \cdot U_{dc}. \quad (9)$$

- Защита от пониженного напряжения в звене постоянного тока (*Low voltage*) (10):

$$U_{dc} < U_{dc_min} = 0.6 \cdot U_{dc}, \quad (10)$$

где U_{dc_min} , U_{dc_max} – минимальное и максимальное допустимое напряжение на звене постоянного тока, В.

2. Критического воздействия на поведение систем векторного и скалярного управления изменений индуктивности намагничивания

L_m в результате дефектов и вариации параметров схемы замещения АД по разработанным имитационным моделям АЭП (рисунок 7, 8).

3. Требования по точности и диапазону регулирования координат, предъявляемых к системам векторного и скалярного управления замкнутых по частоте вращения с датчиком скорости.

В четвертой главе разработаны алгоритмы оценки технического состояния АЭП с учетом дефектов АД согласно рисунку 9.

Оценка технического состояния АЭП построена на основе нескольких уровней, выраженных в виде коэффициентов:

1. Отклонения сигналов (рисунок 10, 11).

2. Элементов в узлах АД (рисунок 12), определяется как (11):

$$K_{dij} = \frac{I_{dij}}{I_{ct_max}}, \quad (11)$$

где I_{ct_max} – максимально допустимое амплитудное значение фазного тока на выходе инвертора, А; I_{dij} – амплитудные значения гармонических составляющих тока, формируемые при дефектах АД, А; $i = \overline{1, n}$, n – количество диагностируемых узлов; $j = \overline{1, m}$, m – количество неисправностей в узле.

3. Уровень узлов АД как (12-15):

$$K_{d1j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d1j}}{I_{ct_max}} \quad (12) \quad K_{d2j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d2j}}{I_{ct_max}} \quad (13)$$

$$K_{d3j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d3j}}{I_{ct_max}} \quad (14) \quad K_{d4j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d4j}}{I_{ct_max}} \quad (15)$$

4. Уровень устройств в виде коэффициента K_{TC} АЭП как (16):

$$K_{TC} = K_{Ad} = g_1 K_{d1j} + g_2 K_{d2j} + g_3 K_{d3j} + g_4 K_{d4j} = \sum_{i=1}^n g_i \sum_{j=1}^m \frac{I_{dij}}{I_{ct_max}}, \quad (16)$$

где g_i – весовые функции, определяемые с учетом критериев энергоэффективности K_I и работоспособности $\sum K_{Me}$.

С учетом пороговых значений гармонических составляющих и общего коэффициента искажений тока выделены уровни оценки технического состояния (таблица 4).

Таблица 4 – Уровни оценки технического состояния АЭП

Индикатор технического состояния $K_{ТС}$	Характеристика технического состояния	Рекомендации к эксплуатации
1	2	3
$0 < K_{ТС} \leq 0,1$	Исправное состояние до порога проявления дефектов	Работа в нормальном режиме
$0,1 < K_{ТС} \leq 0,2$	Исправное состояние с проявлением отклонений, не оказывающих влияние на энергетические и механические характеристики	Работа в нормальном режиме с уменьшением интервала измерений
$0,2 < K_{ТС} \leq 0,4$	Частично неисправное состояние с проявлением дефектов, оказывающим влияние на энергетические и механические характеристики	Допускается при постоянном мониторинге и реализации алгоритмов упреждающего управления
$0,4 < K_{ТС} \leq 1$	Неисправное состояние	Экстренная остановка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новый подход к решению актуальной научно-технической задачи оценки технического состояния электротехнических комплексов с асинхронным электроприводом по частотным составляющим спектра тока.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Выполнено математическое описание частотных составляющих в спектре потребляемого асинхронным двигателем тока, соответствующих дефектам статора, ротора, подшипников и эксцентриситета в воздушном зазоре, с алгоритмом их идентификации и подтверждением результатов промышленным экспериментом на АО «Приборостроительный завод «ВИБРАТОР». (Справка внедрения результатов работы ПРИЛОЖЕНИЕ Д).

2. Обоснованы критерии оценки энергоэффективности и работоспособности автоматизированного электропривода при возникновении дефектов в асинхронном двигателе в виде суммарного коэффициента искажения тока статора и суммарного коэффициента пульсаций электромагнитного момента, на основе которых построена оптимальная область устойчивой работоспособности электропривода.

3. Разработаны численные и имитационные модели автоматизированного электропривода для исследования поведения скалярной и векторной систем управления при условиях эквивалентных неисправностей асинхронного двигателя (патент № 2020615940).

4. Средствами численного и имитационного моделирования определены пороговые значения амплитуд частотных составляющих в спектре потребляемого асинхронным двигателем тока, соответствующие дефектам статора, ротора, подшипников и искажению магнитного поля в воздушном зазоре, с учетом реализованных защит, критических значений параметров схемы замещения и требований к качеству и точности регулирования (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

5. Установлены зависимости энергетических и механических характеристик асинхронного электропривода с векторной и скалярной системой управления при изменении индуктивности цепи намагничивания от технического состояния.

6. Разработаны алгоритмы оценки технического состояния асинхронного автоматизированного электропривода с уровнями оценки сигналов, элементов, узлов, устройств и общего технического состояния.

7. Разработаны и запатентованы способы и устройство оценки технического состояния автоматизированного электропривода с различными алгоритмами управления, отличающиеся алгоритмами анализа частотных составляющих и обобщенного вектора потребляемого тока (патенты и свидетельства: № 2626231, № 2648413, № 181087, № 2727386).

8. Разработан лабораторный стенд автоматизированного электропривода с имитацией дефектов асинхронного двигателя и интегрированной системой оценки технического состояния в систему управления электропривода, на базе лаборатории Schneider Electric Учебно-научного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.

9. Результаты численного и имитационного моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями, выполненными на разработанном лабораторном стенде.

10. Сформулированы рекомендации по направлению дальнейших исследований в части косвенного вычисления фактического значения индуктивности намагничивания при продолжительных режимах работы электропривода с последующей разработкой средств коррекции системы управления.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Королёв, Н.А. Оценка технического состояния и остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем / Ю.Л. Жуковский, Н.А. Королёв, И.С. Бабанова // Горное оборудование и электромеханика, № 6, Москва. – 2017. – С. 20–25.

2. Королёв, Н.А. Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и оценки технического состояния электроприводного газоперекачивающего агрегата / И.С. Бабанова, Ю.Л. Жуковский, Н.А. Королёв // Электротехнические системы и комплексы, № 3 (36), Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск). – 2017. – С. 47-54.

3. Королёв, Н.А. Система управления электроприводом нагнетательных вентиляторов и сетевого насоса для поддержания теплового режима в шахтных стволах. / Н.А. Королёв, Е.М. Васильев, А.В. Николаев // Горное оборудование и электромеханика, № 1, Москва. – 2015. – С. 20-24.

Публикации в изданиях, входящие в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Korolev, N.A. AC motor diagnostics system based on complex parametric analysis / N.A. Korolev, S.V. Solovov. - DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012007. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. - 2017. – Vol. 177, Issue 1. – PP. 1-7.

5. Zhukovskiy, Y.L. The probability estimate of the defects of the asynchronous motors based on the complex method of diagnostics / Y.L. Zhukovskiy, N.A. Korolev, I.S. Babanova, A.V. Boikov. - DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032055. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing - 2017. – Vol.87, Issue 3. PP.1-6.

6. Zhukovskiy, Y.L. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network / Y.L. Zhukovskiy, N.A. Korolev, I.S. Babanova, A.V. Boikov. - DOI:

10.1088/1755-1315/87/3/032056. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. - 2017. – Vol. 87, Issue 3. – PP. 1-6.

7. Zhukovskiy, Y. About increasing informativity of diagnostic system of asynchronous electric motor by extracting additional information from values of consumed current parameter / Y. Zhukovskiy, N. Korolev, N. Koteleva. - DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032158. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. - 2018. - Vol. 1015, Issue 3. – PP. 1-7.

8. Zhukovskiy, Y.L. Diagnostics of an asynchronous motor powered from a self-commutated voltage inverter / Y.L. Zhukovskiy, N.A. Korolev, N.I. Koteleva. - DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012171. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. - 2019. – Vol. 560, Issue 1. – PP. 1-7.

9. Korolev, N.A. Problems of diagnostics of asynchronous motor powered by an autonomous voltage inverter / N.A. Korolev, S.V. Solovev, Y.L. Zhukovskiy. - DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012022. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series. – IOP Publishing. - 2019. – Vol. 643, Issue 1. – PP. 1-7.

10. Korolev, N. Monitoring the technical condition of autonomous electrical systems with electric drive / N. Korolev, S. Solovev. - DOI: 10.1051/e3sconf/201914004015. – Текст: электронный // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences. - 2019. – Vol. 140, Issue 1. – PP. 1-4.

11. Zhukovskiy, Y.L. Asynchronous motor drive operability field with two-link structure of frequency converter / Y.L. Zhukovskiy, N. Korolev, I. Filatova, - DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012127. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series. – IOP Publishing. - 2020. – Vol. 1661, Issue 1. – PP. 1-7.

Патенты:

12. Патент 2626231 Российская Федерация. Способ диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем / Ю.Л.Жуковский, Н.А. Королёв, И.С. Бабанова; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный

университет». – № 2016144271; заявл. 10.11.2016; опубл. 24.07.2017, Бюл. № 21 – 16 с.

13. Патент 2648413 Российская Федерация. Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния электроприводного газоперекачивающего агрегата / Ю.Л. Жуковский, Н.А. Королёв, И.С. Бабанова; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2017101942; заявл. 20.01.2017; опубл. 27.03.2018, Бюл. № 9 – 16 с.

14. Патент 181087 Российская Федерация. Устройство диагностики двигателей переменного тока с преобразователем частоты / Ю.Л. Жуковский, Н.А. Королёв, Б.Ю. Васильев; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 181087; заявл. 19.10.2017; опубл. 04.07.2018, Бюл. № 19 – 8 с.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020615940. Российская Федерация. Программа для определения оптимальных параметров систем управления асинхронного двигателя электропривода с преобразователем частоты / Ю.Л. Жуковский, Н.А. Королев, Б.Ю. Васильев; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2020615940; заявл. 18.05.2020; зарегистр. 04.06.2020; опубл. 04.06.2020 – 1 с.

16. Патент 2727386 Российская Федерация. Устройство диагностики и оценки остаточного ресурса электродвигателей / Ю.Л. Жуковский, Н.А. Королёв, Б.Ю. Васильев, Н.О. Желтиков; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 181087; заявл. 19.10.2017; опубл. 21.07.2020, Бюл. № 21 – 9 с.

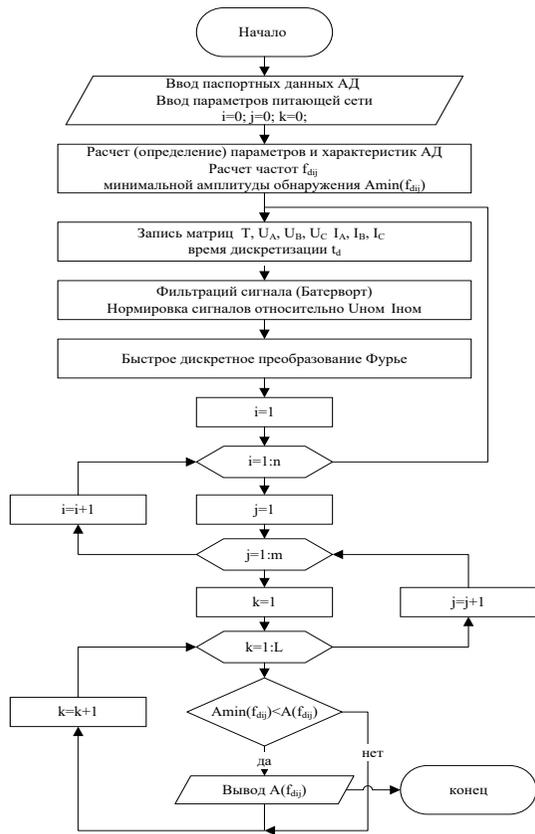


Рисунок 1 – Алгоритм поиска частотных составляющих в спектре потребляемого тока АД

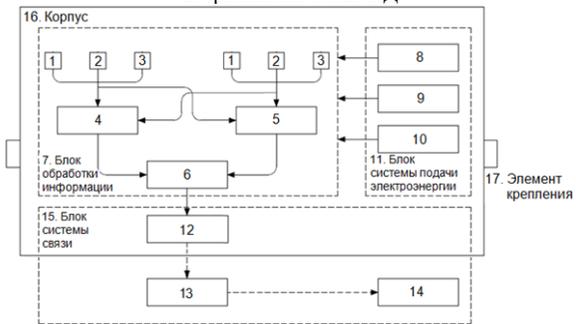


Рисунок 13 – Схема устройства: 1, 2, 3 – датчики тока и напряжения на эффекте Холла; 4 – блок прогнозирования; 5 – блок функциональной диагностики; 6 – блок расчета остаточного ресурса; 7 – блок обработки информации; 8 – аккумуляторная батарея; 9 – соединительный разъем под кабель питания; 10 – блок автономного питания; 11 – блок системы подачи электроэнергии; 12 – передатчик; 13 – сервер; 14 – мобильное устройство; 15 – блок система связи; 16 – корпус; 17 – элемент крепления

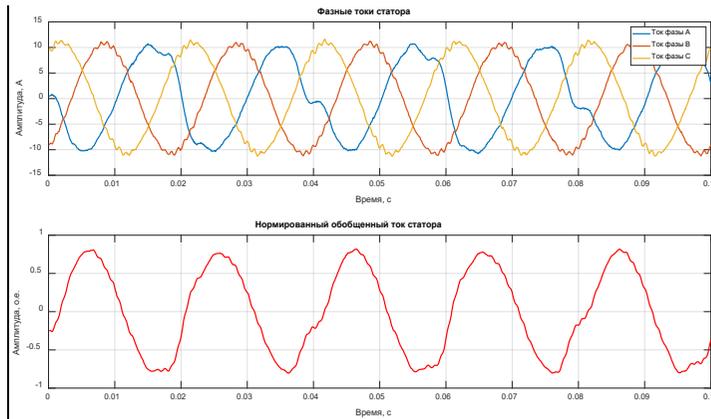


Рисунок 2 – Обобщенный и фазные токи АД при межвитковом замыкании в фазе А

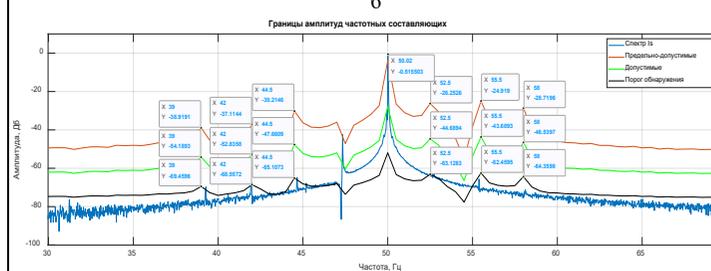
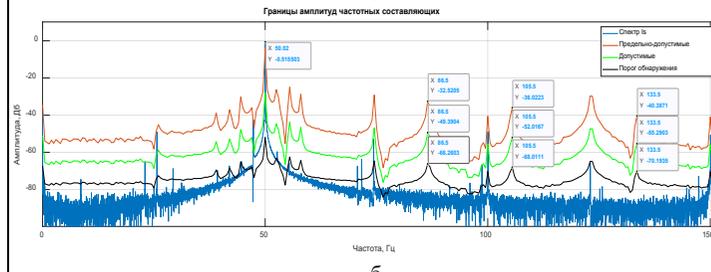
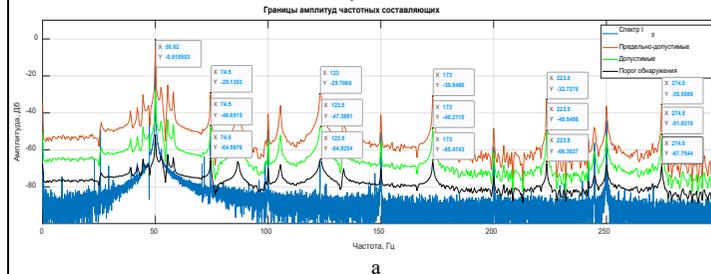


Рисунок 5 – Границы частотных составляющих, характеризующих дефекты АД: а – при межвитковых замыканиях и асимметрии статора; б – при износе подшипников; в – при обрыве стержней ротора

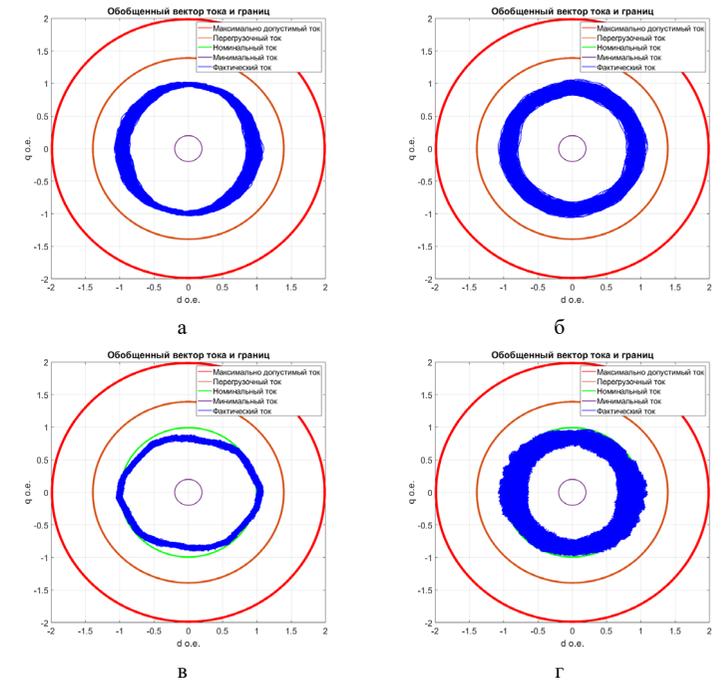


Рисунок 6 – Границы по току асинхронного двигателя: а – при межвитковом замыкании; б – при обрыве стержня ротора; в – при износе подшипника; г – при эксцентриситете воздушного зазора.



Рисунок 12 – Диаграмма технического состояния

Таблица 3 – Значения амплитуд характерных частот

Дефект	Частота дефекта	Диапазон частот f_d дефекта Гц	Порог обнаружения $A, Дб$	Предельное значение $A, Дб$	Предельно-допустимое значение $A, Дб$	Допустимое значение $A, Дб$	Диапазон ошибки частоты Δf_d Гц	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Статор	Межвитковые замыкания в обмотках статора	f_{d11}	70÷300	-64,0	-29,0	-30,0	-46,8	±0,8
	Асимметрия статора	f_{d12}	900÷1200	-75,0	-45,0	-50,6	-63,0	±0,4
Ротор	Обрыв стержней ротора	f_{d21}	30÷70	-63,1 -65,1	-25,0	-26,2 -30,2	-44,6 -47,7	±1,2
	Асимметрия ротора	f_{d22}	до 30	-57,0	х	х	х	х
Эксцентриситет	Статический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d31}	400÷2500	-62,1 -62,3	-23,0 -23,0	-24,2 -24,7	-43,2 -43,5	±1,5
	Динамический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d32}		-70,2 -66,9	-24,0 -26,6	-43,6 -44,7	-62,4 -63,1	±1,5
Подшипники	Тела качения	f_{d41}	80÷140	-68,0	-35,0	-36,0	-52,0	±0,5
	Внутреннее кольцо	f_{d42}		-70,2	-39,0	-40,4	-55,3	±0,5
	Внешнее кольцо	f_{d43}		-69,1	-31,0	-32,5	-49,4	±0,5

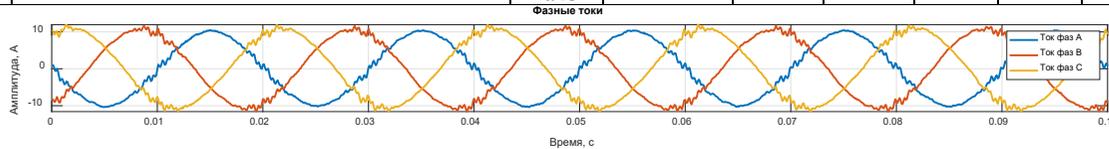


Рисунок 10 – Искажение фазных токов при эксцентриситете

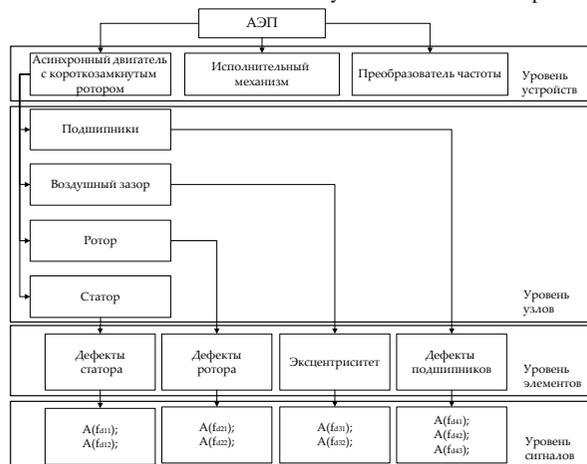


Рисунок 9 – Структурно-функциональная схема

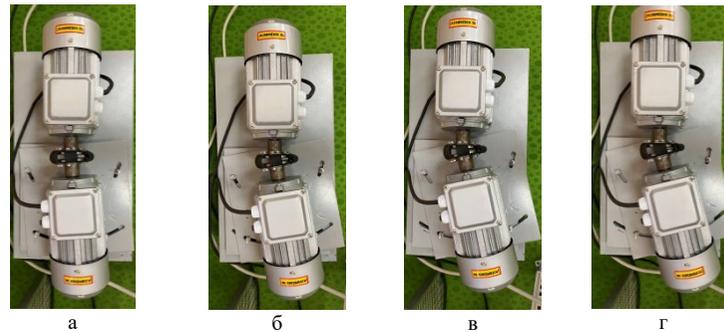


Рисунок 14 – Имитация степени эксцентриситета на лабораторном стенде

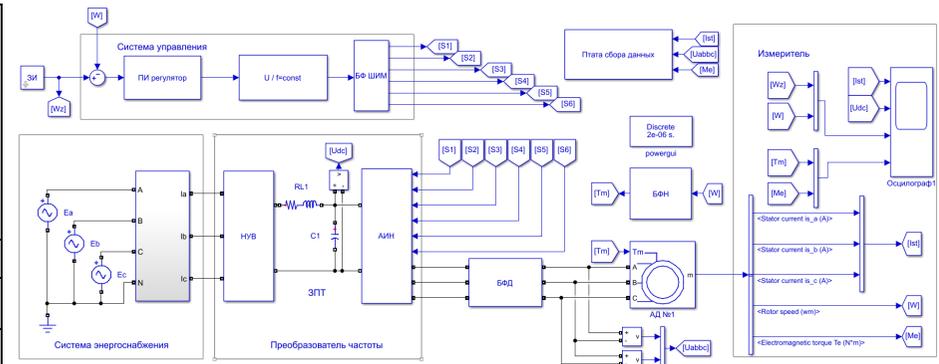


Рисунок 7 – Модель ССУ АД, замкнутая по частоте вращения ротора: ЗИ – датчик интенсивности по скорости; БФ ШИМ – блок формирования ШИМ; БФД – блок формирования дефектов; БФН – блок формирования нагрузки; ЗПТ – звено постоянного тока

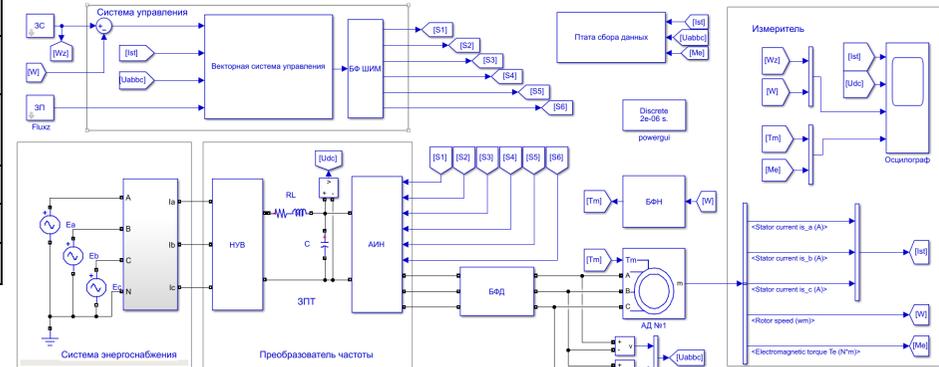


Рисунок 8 – Модель векторной системы управления АД: ЗС – датчик скорости; ЗП – датчик потока ротора; БФ ШИМ – блок формирования ШИМ; БФД – блок формирования дефектов; БФН – блок формирования нагрузки; ЗПТ – звено постоянного тока

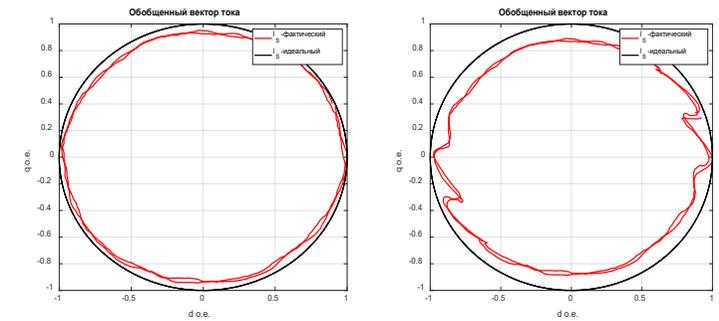


Рисунок 11 – Девияция годографа тока при эксцентриситете