

*На правах рукописи*

**Булдыско Александра Дмитриевна**



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ  
РАННЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ ПУТЕМ  
АНАЛИЗА СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРА ТОКА**

*Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и  
системы*

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

Санкт-Петербург – 2023

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

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент

*Жуковский Юрий Леонидович*

**Официальные оппоненты:**

*Клюев Роман Владимирович*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», кафедра электроснабжения промышленных предприятий, заведующий кафедрой;

*Хальясмаа Александра Ильмаровна*

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», научная лаборатория цифровых двойников в электроэнергетике, заведующий лабораторией.

**Ведущая организация** – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита диссертации состоится **26 декабря 2023 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан **26 октября 2023 г.**

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



УСТИНОВ  
Денис Анатольевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Согласно исследованиям международного энергетического агентства, электродвигатели потребляют более 40% производимого в мире электричества и производят до 5 Гт выбросов CO<sub>2</sub>. И даже небольшое повышение эффективности электродвигателей может значительно снизить потребление энергии и выбросы углекислого газа. Рентабельный потенциал повышения энергоэффективности электро-механических систем с нерегулируемым электроприводом составляет примерно 20-30%, что снизит общий спрос на электроэнергию на 10%.

В нефтегазовой промышленности системы с электрическим приводом составляют более 60% общего потребления электроэнергии. Как при регулируемом, так и при нерегулируемом электроприводе главным образом используются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Любой сбой в работе системы электропривода приводит к значительным экономическим потерям; при этом наличие развивающихся дефектов в асинхронном двигателе приводит к снижению его энергетической эффективности и дополнительным потерям энергии, а также к ускоренному износу всей электро-механической системы, включая сопряженное оборудование. Дополнительную материальную нагрузку на предприятие оказывают традиционные методы технологического обслуживания и ремонта (ТОиР), связанные с остановкой процесса, и более того – аварийные ситуации, связанные с ускоренным износом оборудования, что обуславливает переход к диагностике оборудования по фактическому состоянию.

Учитывая продолжительный режим работы электрических машин в нефтегазовой промышленности и длину жизненного цикла эксплуатации, составляющую более 12-20 лет, наличие развивающихся дефектов приводит к снижению эффективности технологических процессов и ключевых показателей эффективности всей компании. Поэтому необходимо повышать эффективность эксплуатации асинхронного электропривода путем развития современных инструментов диагностики и управления техническим обслуживанием и ремонтом электро-механического оборудования.

В настоящее время при изучении поведения сложных систем широко используется подход, основанный на анализе сигналов, производимых системой. Это актуально, когда математическое описание изучаемого процесса невозможно, но в наборе имеется некоторая отличительная наблюдаемая величина. Применительно к задаче выявления дефекта, необходимо выделить из сигнала компоненты, ответственные за некоторое искажение исходного сигнала исправного двигателя. Обычно такие «подсигналы» незначительны, особенно на ранних стадиях развития дефекта, что создает дополнительные трудности при их дифференциации.

В нефтегазовой отрасли к доле оборудования (например, к погружным насосам) доступ ограничен, а в ряде случаев, таких как эксплуатация буровых установок, присутствуют дополнительные паразитные вибрации, искажающие анализ сигналов. Поэтому исследование построено на методах на основе анализа электрических сигналов АД, которые более доступны и контролируемы в рабочем режиме.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Общий вклад в исследование надежности и вопросы диагностирования электрических машин внесли многие отечественные и зарубежные ученые, в том числе: Гольдберг О.Д., Клюев В.В., Воропай Н.И., Розанов М.Н., Савельев В.А., Bonnett A.H., Habetler T.G., Thomson W.T. и др. Существенный вклад в разработку методов и систем диагностирования асинхронных двигателей внес Козярук А.Е. Разработка и оценка методик диагностирования АД по потребляемому току статора рассмотрена в трудах Баркова А.В., Баширова М.Г., Вейнреба К.Б., Новожилова А.Н., Рогачева В.А., Merizalde Y., Garcia-Perez A. Fenger M.

Широкий спектр подходов к оценке технического состояния электрооборудования и электромеханического оборудования рассмотрен в работах Назарычева А.Н., Абрамовича Б.Н., Носова В.В., Клюева Р.В., Иванова С.Л., Шишлянникова Д.И., Varabady J.

Современные интеллектуальные подходы и инструменты применительно к системам диагностики и технического обслуживания и ремонта изложены в работах Хальясмаа А.И., Котелевой Н.И., Филиппова Е.В., AlShorman O., Kumar R.R., Khandelwal M., Ayani M., Vathoopan M.

Развитию метода сингулярного разложения временного ряда посвящено множество трудов Голяндиной Н.Е., практическая сторона применения данного метода рассмотрена в работах Ревина И.Е., Кузьмина О.В., Zhao X., Liang L.

**Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности:**

Диссертация соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

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

**Объект исследования** – электротехнические комплексы промышленных предприятий, имеющие в своем составе электропривод, построенный на основе асинхронного двигателя.

**Предмет исследования** – методы анализа электрических параметров для ранней идентификации дефектов асинхронного двигателя.

**Цель работы** – повышение эффективности эксплуатации асинхронного электропривода путем применения алгоритма обнаружения дефекта на ранней стадии развития на основе токов статора.

**Идея работы** – раннее обнаружение дефектов асинхронного двигателя реализуемо на основе математического анализа временного ряда сигнала тока и позволяет снизить потери электроэнергии и стоимость эксплуатации электродвигателя.

**Задачи исследования:**

1. Выявить научно-технические проблемы эффективности функционирования объектов добычи и транспорта нефти и связанных электротехнических комплексов.

2. Проанализировать влияние наличия дефектов асинхронного двигателя на показатели эффективности электротехнических комплексов объектов добычи и транспорта нефти.

3. Проанализировать эффективность методов диагностики АД, основанных на анализе параметров вибрации и электрических параметров в составе электротехнических комплексов.

4. Разработать метод ранней идентификации дефектов АДКЗР и отслеживания их развития на основе математических методов анализа временных рядов сигналов тока.

5. Провести экспериментальные исследования асинхронного двигателя с физической имитацией дефектов и анализ эффективности применения методики идентификации дефектов на ранней стадии развития.

6. Проанализировать эффективность управления техническим обслуживанием и ремонтом асинхронных двигателей в составе электротехнических комплексов транспорта нефти и разработать алгоритм воздействия на ТОиР АД на основе выявления дефекта и отслеживания его развития.

7. Разработать модель оценки стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла электродвигателя с учетом потерь, обусловленных наличием дефекта.

8. Разработать систему принятия решения по эффективному регулированию техническим обслуживанием и ремонтом асинхронных двигателей на основе потерь электроэнергии и стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла.

#### **Научная новизна работы:**

1. Предложен алгоритм на основе сингулярного спектрального анализа тока асинхронного двигателя, отличающийся тем, что позволяет выделять группы и категории компонент временного ряда тока статора АД, идентифицирующие наличие дефекта на ранней стадии развития и позволяющие отслеживать изменения уровня развития дефектов.

2. Экспериментально установлены зависимости изменения уровня вклада компонент, групп компонент и категорий компонент от уровня развития дефектов асинхронного двигателя: образования раковин в подшипнике, ослабления креплений и несоосности валов.

3. Предложен алгоритм воздействия на план ТОиР на основе раннего обнаружения уровня дефекта асинхронного двигателя и оценки стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла, с учетом потерь, обусловленных наличием дефекта.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработана алгоритм выявления дефекта на ранней стадии развития и отслеживания его развития по токам фаз статора и обоб-

щенному току двигателя и методика выявления признаков, характеризующих возникновение и развитие дефекта на основе метода сингулярного разложения исходной выборки применительно к сигналу тока статора АДКЗР.

2. Разработана модель оценки стоимости жизненного цикла эксплуатации асинхронного электродвигателя с учетом потерь, обусловленных наличием дефектов.

3. Предложен алгоритм воздействия на план технического обслуживания и ремонта асинхронных двигателей в составе электротехнического комплекса транспорта нефти на основе модели оценки стоимости процесса эксплуатации асинхронного электродвигателя с учетом потерь, обусловленных наличием дефектов.

Результаты внедрены в производственную деятельность ООО «НПП «Комплексные интеллектуальные технологии» при разработке микропроцессорных устройств релейной защиты в электротехнических комплексах, имеющих в своем составе электропривод, построенный на основе асинхронного электродвигателя, в виде «Алгоритма выявления дефекта подшипника асинхронного двигателя на основе анализа сингулярного спектра тока статора» (акт внедрения от 31.05.2023). Работа выполнялась в рамках НИР «Применение цифровых двойников для управления энергоэффективностью и надежностью объектов» ПАО «НК «Роснефть» по договору № 100021/03521Д от 19.07.2021 и НИ-29-808-21 «Цифровая платформа предиктивной аналитики и управления жизненным циклом электромеханического оборудования «GenesisDrive» в рамках субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год № FSRW-2020-0014.

#### **Методология и методы исследования**

Результаты диссертационной работы получены с помощью методов анализа и обобщения данных, статистических методов обработки данных, методов численного анализа; теории обобщенной электрической машины; теории электропривода; теории временных рядов; методов машинного обучения и программирования на языке Python. Имитация дефектов выполнена на лабораторном стенде «Мо-

нитинг и диагностика электромеханического оборудования» Образовательного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Изменение компонент сингулярного спектра мгновенных значений сигналов токов статора асинхронного двигателя позволяет обнаружить и отследить развитие дефекта на ранней стадии развития при вариации нагрузки и определить дополнительные потери электроэнергии, обусловленные наличием дефекта.

2. Применение алгоритма управления планом ТОиР на основе раннего обнаружения дефектов по электрическим параметрам и оценки стоимости процесса эксплуатации с учетом потерь, обусловленных наличием дефектов, позволяет повысить эффективность эксплуатации асинхронного электропривода в составе электротехнических комплексов объектов добычи и транспорта нефти.

**Степень достоверности результатов** исследования подтверждена численным и имитационным моделированием, экспериментальными исследованиями на базе Образовательного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы представлены на следующих семинарах и конференциях: Международный семинар «The 12th German-Russian raw materials conference. Young researchers day» 27 ноября 2019 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет; III Международный молодежный научно-практический форум «Нефтяная столица» 17-21 февраля 2020 г., г. Нижневартовск; III Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» 5-6 марта 2020 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет; X Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых», 14-16 октября 2020 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет; III Международная научная конференция «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» SEWAN-



2021, 19-24 апреля 2021 г., г. Санкт-Петербург, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», 22-26 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет.

**Личный вклад автора.** В рамках исследования автором были сформулированы цели и задачи исследования, выполнен обзор отечественной и зарубежной научной литературы, проведен анализ существующих методов идентификации дефектов. Сформулированы и доказаны научные положения. Разработана методика ранней идентификации и отслеживания развития дефектов асинхронного двигателя на основе математических методов анализа временных рядов сигналов тока. Предложена модель оценки стоимости процесса эксплуатации АД с учетом потерь, обусловленных наличием дефекта. Основные результаты диссертационной работы изложены в подготовленных научных публикациях и представлены на конференциях.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 6 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 177 наименований. Работа изложена на 202 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка, 48 таблиц, 5 приложений.

#### **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность кандидату технических наук, директору Образовательного центра цифровых технологий Жуковскому Юрию Леонидовичу за неоценимую помощь и вклад в подготовку и проведение научных исследований по диссертации.

## 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** проанализировано современное состояние НГП РФ, представлены оценочные показатели энергоэффективности ключевых объектов нефтегазового комплекса, обоснована необходимость более раннего обнаружения неисправностей и необходимость повышения эффективности эксплуатации АЭП в составе электротехнических комплексов объектов добычи и транспорта нефти.

**Во второй главе** отражена связь между энергетическими показателями и наличием дефектов АД на основе имитационного моделирования. Приведен обзор существующих и перспективных методов диагностики АД, обоснован переход к токовой диагностике АД и обоснован выбор метода сингулярного разложения для исследования временного ряда потребления тока статора АД. Предложена методика выявления признаков, характеризующих возникновение и развитие дефекта, и изложен алгоритм обнаружения неисправностей АД на основе тока статора методом сингулярного спектрального анализа.

**В третьей главе** приведено описание постановки эксперимента, лабораторного стенда и его компонентов, представлены результаты применения предлагаемой методики для обнаружения дефектов вида «образование раковин в подшипниках», «несоосность валов», «ослабление механических креплений».

**В четвертой главе** выделены особенности ТОиР насосных систем и современные тенденции в управлении ТОиР АД. Предложен алгоритм воздействия на план ТОиР АД в составе ЭТК транспорта нефти на основе выявления ранней стадии развития дефекта и отслеживания его уровня, а также структура системы принятия решения по воздействию на план ТОиР в зависимости от уровня потерь электроэнергии и результатов модели оценки стоимости жизненного цикла эксплуатации, учитывающей наличие дефектов двигателя.

**Заключение** отражает обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Изменение компонент сингулярного спектра мгновенных значений сигналов токов статора асинхронного двигателя позволяет обнаружить и отследить развитие дефекта на ранней стадии развития при вариации нагрузки и определить дополнительные потери электроэнергии, обусловленные наличием дефекта.**

На основе проведенного в работе анализа существующих методов диагностики АД и исследования сигналов тока статора, был выбран метод, основанный на сингулярном разложении исходной выборки (SVD) как зарекомендовавший себя в направлении методов исследования динамики процессов, обладающих сложной переменной структурой. Результатом применения метода является разложение временного ряда на простые компоненты: тренды, периодические или колебательные составляющие, которые затем сопоставляются с режимом работы и уровнем исследуемого дефекта.

Метод сингулярного анализа состоит из двух основных этапов – декомпозиции и реконструкции. Структурная схема выполнения методики приведена на рисунке 1.

– *Вложение.* Сигналы тока фаз АД, записанные в файл при определенном режиме нагрузки и уровне дефекта, преобразовывались в вектор  $X$ , представляющий собой упорядоченный набор  $N$  мгновенных значений тока. Затем осуществляется процедура преобразования одномерного ряда в многомерный с помощью однопараметрической сдвиговой процедуры (1, 2):

$$X_i = (x_{i-1}, \dots, x_{i+L-1})^T, 1 \leq i \leq K \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = [X_1 : \dots : X_K] = (x_{ij})_{i,j=1}^{L,K} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_K \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{K+1} \\ x_3 & x_4 & x_5 & \dots & x_{K+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & x_{L+2} & \dots & x_N \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $X = [x_i, \dots, x_N]$  – исходный одномерный ряд длины  $N$ ;  $L$  – длина окна,  $1 < L < N$ ;  $K = N - L + 1$  – число последовательностей. Векторы  $L, K$  образуют траекторную матрицу  $\mathbf{X} = [X_1 : \dots : X_K]$  исходного временного ряда сигнала тока статора, которая является Ганкелевой и имеет одинаковые элементы на диагонали  $i + j = \text{const}$ :

– *Разложение (Singular value decomposition)*. Исследование полученной многомерной траектории с помощью анализа главных компонент (сингулярного разложения, SVD) (3):

$$A = U\Sigma V^T, \quad (3)$$

где  $U = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in \mathbb{R}^{m \times m}$  – унитарная матрица левых сингулярных векторов,  $V = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  – унитарная матрица правых сингулярных векторов,  $\Sigma$  – диагональная матрица размером  $m \times n$ , диагональные элементы которой – неотрицательные значения сингулярных чисел матрицы  $A$  в порядке убывания,  $\Sigma = [\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m), 0] \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ,  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots, \sigma_m > 0$ .

В результате применения метода SVD, мы получим (4):

$$\mathbf{X} = \sum_i \mathbf{X}_i, \quad \mathbf{X}_i = \sigma_i U_i V_i^T, \quad (4)$$

где сингулярное значение  $\sigma_j = \sqrt{\lambda_j}$ ;  $(\sqrt{\lambda_j} U_j V_j^T)$  –  $j$ -ая собственная тройка сингулярного разложения.

– *Группировка компонент*. Данный шаг строится на основании формулы (4). Процедура группировки разбивает все множество индексов  $\{1, \dots, d\}$  на  $m$  непересекающихся подмножеств  $I_1, \dots, I_m$ , где каждая  $I_j$  содержит несколько  $\mathbf{X}_I$ .

Пусть  $I = \{i_1, \dots, i_p\} \subset \{1, \dots, d\}$ , тогда результирующая матрица  $\mathbf{X}_I$ , соответствующая группе  $I$  определяется как  $\mathbf{X}_I = \mathbf{X}_{i_1} + \dots + \mathbf{X}_{i_p}$ . Тогда разложение траекторной матрицы может быть записано в виде (5):

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{I_1} + \dots + \mathbf{X}_{I_m}, \quad (5)$$

В исследовании рассматривается несколько подходов к группировке: на основе визуальной оценки о схожести структуры матриц компонент, метод скаттерграмм и группировка на основе матрицы  $W$ -корреляции. Последний показал свою эффективность, и в виду наличия преимущества в скорости выполнения, использовался для анализа всех рассматриваемых сигналов.

– *Реконструкция исходного сигнала*. На заключительном этапе алгоритма каждая из матриц  $\mathbf{X}_{I_m}$  из разложенных (5) преобразуется

обратно в форму исходного объекта  $X$ . Эта операция осуществляется с помощью ганкелизации матриц (диагонального усреднения) (6).

$$\tilde{y}_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{s-1} \sum_{l=1}^{s-1} y_{l,s-l}^* & 2 \leq s \leq L^*, \\ \frac{1}{L^*} \sum_{l=1}^{L^*} y_{l,s-l}^* & L^* \leq s \leq K^* + 1, \\ \frac{1}{N-s+2} \sum_{l=s-K^*}^{L^*} y_{l,s-l}^* & K^* + 2 \leq s \leq N + 1, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{L \times K}$ ,  $1 \leq i \leq L$ ,  $1 \leq j \leq K$ .  $L^* = \min(L, K)$ ,  $K^* = \max(L, K)$  и  $N = L + K - 1$ ,  $s = i + j$ . Таким образом, исходный ряд тока статора АД раскладывается в сумму восстановленных рядов, представляющих собой компонентный состав тока статора.

Для апробации методики были выполнены экспериментальные исследования, направленные на создание условий имитации дефектов, а именно: деградация подшипников, несоосность валов исследуемого и нагрузочного АД, ослабление механических креплений двигателя к платформе (рисунок 2).

На рисунках 3 – 5 приведена визуализация выполнения этапов сингулярного спектрального анализа на примере исследования образования раковин в подшипниках.

В результате сингулярного разложения тока статора и восстановления временных рядов, получается упорядоченное по убыванию представление компонент. Установлено, что используя уровень вклада и отслеживание перемещения характерных временных рядов, возможно наблюдение как за появлением новых компонент в сигнале тока, так и за изменением вклада определенных компонент в общую структуру. При появлении и увеличении дефекта ряд компонент как нестационарного, так и стационарного характера, увеличивают свой вклад в общую структуру сигнала, что приводит к увеличению их порядковых номеров. Такая структура представления данных позволяет формировать сингулярные компонентные диагностические карты (СКДГ), которые при периодической оценке используются для выявления изменений в работе асинхронного двигателя.

Оценка относительного вклада компонент в основной сигнал, а также кумулятивный вклад рассчитываются по выражениям (7):

$$RC_i = \frac{\sigma_i^2}{\sum_{k=0}^{d-1} \sigma_k^2}, \sum_{i=0}^i RC_i = \frac{\sum_{j=0}^i \sigma_j^2}{\sum_{j=0}^{d-1} \sigma_k^2}, \quad (7)$$

Введен порядок поступательной численной оценки вклада компонент в исходный сигнал в зависимости от степени проявления дефекта: от индивидуальных компонент  $|RC(X_i)_B - RC(X_i)_A| > 0$ , к оценке вклада групп на основании иерархической кластеризации  $|RC(G_i)_B - RC(G_i)_A| > 0$ ; и к оценке категорий компонент  $|RC(C_i)_B - RC(C_i)_A| > 0$ .

Выявленное свойство миграции компонент характеризуется следующими факторами: 1. Степень перемещения компоненты  $|i_B - i_A| > 0$ , где  $i_A, i_B$  – номер компоненты в состояниях машины А и В соответственно; 2. Частота перемещений компонент на наблюдаемых отрезках сигнала  $\omega = \frac{n}{\sum i}$ , где  $n$  – наблюдаемое количество перемещений компоненты при сравнении состояний АД при оценке одного вида дефекта.

Сравнение полученных результатов по обнаружению развивающихся дефектов по поставленным экспериментам методами быстрого преобразования Фурье и сингулярным спектральным анализом представлены в таблицах 1 – 4.

Выделение компонент, которые при появлении дефекта изменятся на диагностической компонентной карте, позволяет сопоставить рост вклада с увеличением дефекта и ростом потерь мощности и энергии (8):

$$\Delta W(t_{o.p.}) = \int_0^{t_{o.p.}} (p_{i+1}(t_{o.p.}) - p_i(t_{o.p.})) dt, \quad (8)$$

где  $p_i(t_{o.p.})$  – мгновенная мощность  $i$ -го оборота вала ротора;  $t_{o.p.}$  – время оборота вала ротора. Влияние развивающегося дефекта на показатели энергетической эффективности АД и исследованный процентный вклад потерь при разных типах дефектов при вариации нагрузки приведены на рисунке 6. На основании выбранной методики сингулярного спектрального анализа применительно к току статора АД сформулирован алгоритм раннего обнаружения дефектов АД.

**2. Применение алгоритма управления планом ТОиР на основе раннего обнаружения дефектов по электрическим параметрам и оценки стоимости процесса эксплуатации с учетом потерь, обусловленных наличием дефектов, позволяет повысить эффективность эксплуатации асинхронного электропривода в составе электротехнических комплексов объектов добычи и транспорта нефти.**

В работе предлагается алгоритм воздействия на план ТОиР, базирующийся на алгоритме раннего обнаружения дефектов АД, выявленных свойствах при декомпозиции сигнала и оценке энергетических потерь АД. Предполагается, что данный подход позволит сформировать условия изменения плана ТОиР, опираясь на фактическое состояние АД. Данный алгоритм входит в систему принятия решений по воздействию на план ТОиР, также как и предлагаемая модель оценки стоимости жизненного цикла АД с целью оценки эффективности принятых решений по управлению ТОиР (9).

$$LCC = -I - (E_M + E'_L) \cdot p_E \cdot k_{p1} - C_{MRO} \cdot k_{p2} - C_D + V_R, \quad (9)$$

где  $I$  – первоначальные инвестиции (покупка двигателя),  $E_M, E'_L$  – потребленная двигателем энергия (механическая, электрическая с учетом потерь на техническое состояние),  $p_E$  – стоимость электроэнергии,  $C_{MRO}$  – стоимость обслуживания,  $k_{p1}, k_{p2}$  – коэффициенты кумулятивной приведенной стоимости при изменении цены на электроэнергию и обслуживание соответственно,  $C_D, V_R$  – стоимость вывода из эксплуатации и прибыль от утилизации, в расчете принимается допущение:  $(C_D + V_R \approx 0)$ .

Для модели используется график нагрузки оборудования, характерный для предприятий нефтяной промышленности (рисунок 7).

Для апробации модели рассмотрен ряд двигателей типа ВА мощностью от 0,37 до 90 кВт, выявлены зависимости стоимости двигателя и капитального ремонта от мощности. Спектр работ по обслуживанию, их количество и периодичность для АД транспортных систем нефтегазовой отрасли определен в соответствии с РД (таблица 5). Средний установленный срок службы двигателей рассматриваемого ряда мощностей составляет от 12 до 15 лет. Стоимость электроэнергии и ее рост определены на основе ретроспективного анализа

изменения прогноза свободных (нерегулируемых) цен на электрическую энергию (мощность) для II ценовой зоны, по данным НП «Совет рынка» за период 2017-2023 гг.

Таким образом, для определенного модельного ряда двигателей с типовой механической нагрузкой варьируются следующие переменные: уровень потерь, обусловленных наличием дефекта, цена на электроэнергию, ставка дисконтирования, сдвиг плана ТОиР, выраженный в процентном отношении (таблица 6).

Расчет параметров производится следующим образом (10):

$$I(P_{\text{ном}}) \approx (1 - k_d + k_A) \cdot C_p, \quad (10)$$

где  $k_d$  – ставка дисконтирования,  $k_A \approx 0,1$  – дополнительные затраты, пропорциональные закупочной цене.  $C_p$  – стоимость АД.

$$C_{MRO} = (\text{Обслуживание в первый год}) + (\text{Остаток операций}) \cdot k_{p2}$$

$$(\text{Обслуживание в первый год}) = (c_1 \cdot P_K + c'_1 \cdot P_T + c''_1 \cdot \text{ТО} + c'''_1 \cdot \text{ДК})$$

где  $P_K, P_T, \text{ТО}, \text{ДК}$  – количество операций по капитальному ремонту, текущему ремонту, техническому обслуживанию и диагностическому контролю соответственно в первый год обслуживания, определяется по РД предприятия,  $c_1 - c'''_1$  – стоимость операций.

Количество потерь электроэнергии в течение первого года эксплуатации с учетом дополнительных потерь, обусловленных наличием дефекта, рассчитывается по формуле (11):

$$\begin{aligned} E'_L &= \int_0^T P'_L dt \approx \int_0^T \left( k'_{LF} + k'_{LV} \cdot \frac{P^2(t)}{P_{\text{ном}}^2} \right) dt = \\ &= T \cdot \left( k'_{LF} + k'_{LV} \cdot \frac{P_{RMS}^2}{P_{\text{ном}}^2} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $P_{RMS}$  – среднеквадратическая нагрузка,  $P_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_k P^2(t_k) \cdot t_k}$ ;

$P'_L$  – электрические потери двигателя, основанные на конструктивных, с учетом вклада потерь, определенных на основе экспериментов (12) (рисунок 8):

$$P'_L = P_{pu} \cdot P_{\text{ном}} \left( \frac{1}{\eta(P_{\text{ном}}, P_{pu})} - 1 \right) \cong k'_{LF} + k'_{LV} \cdot P_{pu}^2, \quad (12)$$

где  $k_{LF}, k_{LV}$  – постоянные и переменные потери, выводимые из уравнений линейной регрессии по точкам постоянных и переменных потерь для всего модельного ряда двигателей производителя.



Потери, обусловленные механической нагрузкой (13):

$$E_M = \int_0^T P(t) dt = T \cdot P_m, P_m = \frac{1}{T} \sum_k P(t_k) \cdot t_k, \quad (13)$$

где  $T$ ,  $P_m$  – время работы в год и среднегодовое значение нагрузки.

Тепловые карты СПР и общая структурная схема на основе представленных алгоритмов приведены на рисунках 9 и 10. Периодичность проведения подобной оценки может проводиться при обновлении данных по любому из параметров модели (9).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается новое решение актуальной научной задачи повышения эффективности эксплуатации асинхронного электропривода на основе ранней идентификации дефектов методом сингулярного спектрального анализа.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Проанализировано современное состояние НГП РФ, обоснована необходимость повышения эффективности эксплуатации АД на предприятиях нефти и газа. Обоснована необходимость создания методов обнаружения повреждений на ранней стадии, а также определения потерь, обусловленных повреждениями для своевременного принятия решений в условиях ограниченных финансовых и материальных ресурсов.

2. На основе проведенного имитационного моделирования подтверждено влияние наличия дефектов АД на энергетические показатели эффективности АД; на основе экспериментальных исследований установлено, что наличие дефектов АД при номинальной нагрузке приводит к дополнительным потерям в случае образования раковин в подшипнике до 10 %, несоосности – 11%, ослабления креплений – 2,5% относительно номинальных потерь.

3. Разработан алгоритм обнаружения неисправностей АД на основе сингулярного спектрального анализа применительно к сигналам тока статора АД. Предложены новые признаки выделяемых компонент по свойству стационарности: стационарные, слабостационарные, мигрирующие учитывающий различные методы группировки компонент и определение их вклада. Экспериментально установлено, что разработанный алгоритм позволяет провести декомпозицию сиг-

нала и, по результатам группировки компонент на основе определения вклада и выявления миграции компонент, установить наличие дефекта на ранней стадии развития.

4. По результатам экспериментальных исследований установлено, что методы, основанные на спектральном анализе тока, не позволяют выявить повреждения на начальной стадии развития и однозначно дать информацию о наличии дефекта и его изменении. Сравнительный анализ показал превосходство предлагаемой методики на основе сингулярного разложения относительно анализа тока методом быстрого преобразования Фурье.

5. Установлены зависимости изменения уровня вклада компонент при разложении фазных токов и обобщенного тока от уровня изменения дефектов асинхронного двигателя. Выявлено, что рост уровня вклада компонент, соотносящихся с наличием и развитием дефекта, соответствует росту потерь мощности, обусловленных наличием дефекта.

6. Разработана модель оценки стоимости жизненного цикла (LCC), учитывающая режим работы АД в составе ЭТК транспорта нефти, потери, обусловленные нагрузкой, конструктивными особенностями и наличием дефекта, а также стоимость потребляемой электроэнергии на протяжении жизненного цикла и стоимость обслуживания асинхронного двигателя.

7. Предложена структура системы принятий решения по воздействию на план ТОиР, включающая алгоритм воздействия на план ТОиР АД в составе ЭТК на основе алгоритма раннего обнаружения дефектов АД методом сингулярного спектрального анализа с целью определения отклонения фактической кривой потерь электроэнергии с учетом вклада компонент и определения уровня их изменения.

8. Установлено, что применение системы принятия решения по воздействию на план ТОиР в зависимости от потерь, вызванных развивающимся дефектом, и оценки на основе стоимости жизненного цикла позволяет снизить затраты стоимости на жизненном цикле эксплуатации до 8% и потери электроэнергии, обусловленные наличием дефекта, до 5%.

В работе выделен ряд аспектов для развития темы и проведения дополнительных исследований, включая переход к распознаванию влияния сопряженного оборудования, исключению влияния гармо-

нических искажений на результаты дифференциации дефектов в сингулярных компонентных картах АД и как следствие – обнаружению причин появления дефекта.

#### СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Zhukovskiy, Y.L. Analysis of technological changes in integrated intelligent power supply systems / Y.L. Zhukovskiy, V.V. Starshaia, D.E. Batueva, **A.D. Buldysko** // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects: Proceedings of the 11th Russian-German Raw Materials Conference, November 7-8. – 2018. – № 1. – Pp. 249-258. Potsdam, Germany.

2. Zhukovskiy, Y. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform / Y. Zhukovskiy, D. Batueva, **A. Buldysko**, M. Shabalov – DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033. – Текст: электронный // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333, Issue 6.

3. Zhukovskiy, Y.L. Fossil energy in the framework of sustainable development: Analysis of prospects and development of forecast scenarios / Yu.L. Zhukovskiy, D.E. Batueva, **A.D. Buldysko**, B. Gil, V.V. Starshaia. – DOI: 10.3390/en14175268. – Текст: электронный // Energies. – 2021. – Vol. 14, Issue 17.

4. Shabalov, M.Yu. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector / M.Yu. Shabalov, Yu.L. Zhukovskiy, **A.D. Buldysko**, B. Gil, V.V. Starshaia. – DOI: 10.1016/j.egyр.2021.05.001. – Текст: электронный // Energy Reports. – 2021. – Vol. 7. – Pp. 2664-2680.

5. Zhukovskiy, Y. Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic / Yu. Zhukovskiy, **A. Buldysko**, Y. Malkova, A. Koshenkova, A. Stoianova, P. Tsvetkov. – DOI: 10.3390/resources10120124. – Текст: электронный // Resources. – 2021. – Vol. 10, Issue 12.

6. Zhukovskiy, Y. Induction Motor Bearing Fault Diagnosis Based on Singular Value Decomposition of the Stator Current / Y. Zhukovskiy, **A. Buldysko**, I. Revin. – DOI: 10.3390/en16083303. – Текст: электронный // Energies. – 2023. – Vol. 16, Issue 8.

*Публикации в прочих изданиях:*

7. Жуковский, Ю.Л. Исследование применения цифровых технологий для управления жизненным циклом оборудования / Ю.Л. Жуковский, **А.Д. Булдыско** // Сборник материалов Форума проектов программ Союзного государства. Минск, БНТУ. – 2018. – С. 52-56.

8. Жуковский, Ю.Л. Применение технологии цифровых двойников для управления жизненным циклом электрооборудования / Ю.Л. Жуковский, **А.Д. Булдыско** // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: матер. IX Междунар. молод. науч.-техн. конф. (Казань, 1–5 октября 2018 г.): в 3 т. – Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. – 2018. – С. 189-190.

9. Жуковский, Ю.Л. Применение технологии цифровых двойников в составе единого программного комплекса для управления жизненным циклом электрооборудования / Ю.Л. Жуковский, **А.Д. Булдыско** // Сборник материалов XLVII научной конференции с международным участием «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбПУ», 19-24 ноября 2018 г. Институт энергетики и транспортных систем. – 2018. – Ч. 2. – С. 147-150.

10. Жуковский, Ю.Л. Оптимизация параметров работы нефтепроводной системы в условиях Крайнего Севера / Ю.Л. Жуковский, **А.Д. Булдыско** // Нефтяная столица. Третий Международный молодежный научно-практический форум. Сборник материалов. – 2020. – С. 41-44.

*Патенты:*

11. Программа для измерения напряжения износа подшипника асинхронного двигателя по компонентам векторов Парка тока и напряжения / Н.И. Котелева, Н.А. Королёв, **А.Д. Булдыско** / Гос. регистр. Программы для ЭВМ. RU2022616081, 05.04.2022 Бюл. No 4. заявитель: СПГУ.

12. Программа распознавания наличия дефекта подшипника асинхронного двигателя / Ю.Л. Жуковский, **А.Д. Булдыско** / Гос. регистр. Программы для ЭВМ. RU2023660650, 23.05.2023 Бюл. No 6. заявитель: СПГУ.

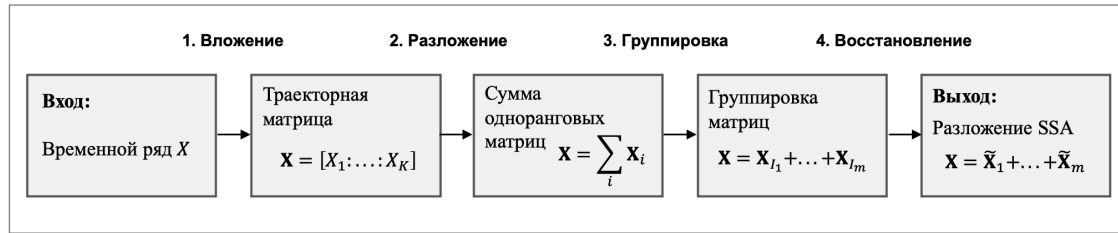


Рисунок 1 – Структурная схема выполнения SSA



Рисунок 2 – Вид спарки исследуемого и нагрузочного АД с создаваемыми ослаблениями креплений

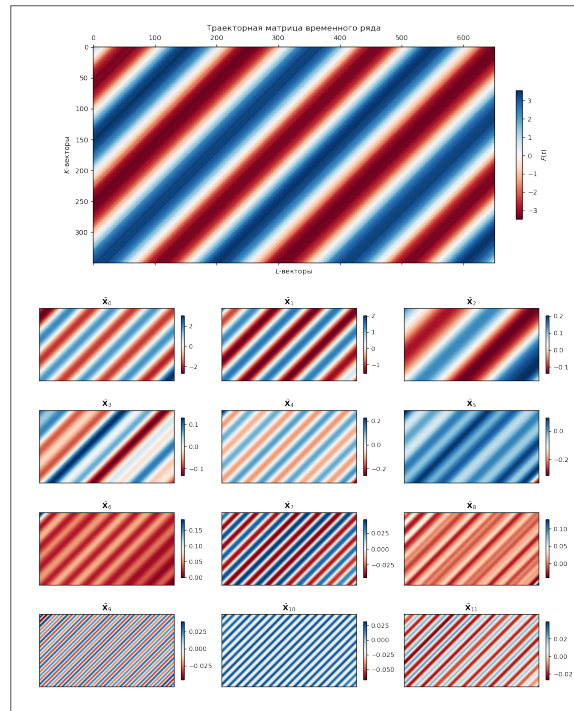


Рисунок 3 – Этап декомпозиции: построение и разложение траекторной матрицы

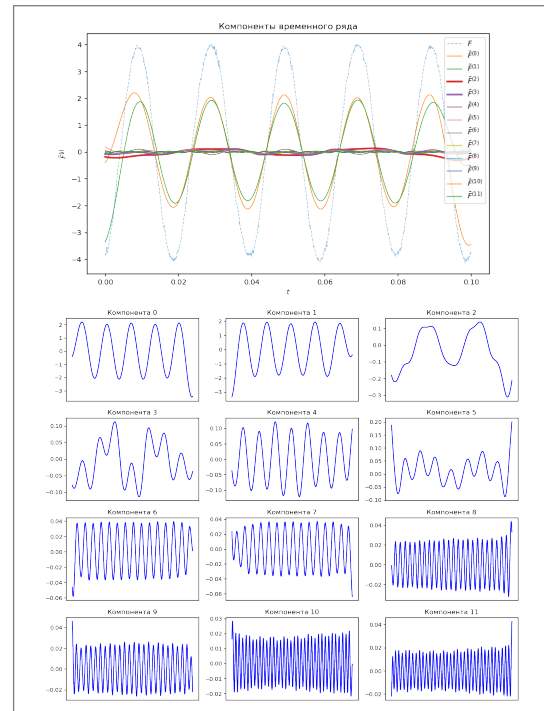


Рисунок 4 – Этап восстановления: группировка и диагональное усреднение матриц

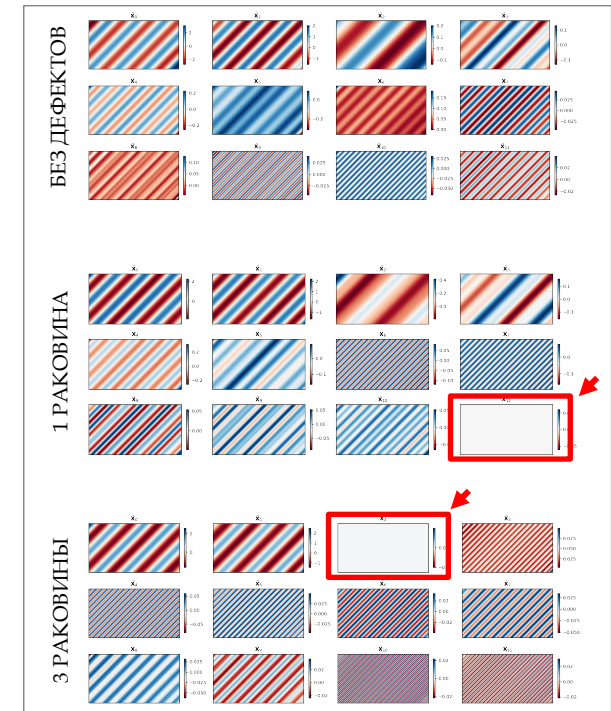


Рисунок 5 – Результат разложения траекторных матриц на примере исследования образования раковин в подшипниках, обнаружение вырождения компонент

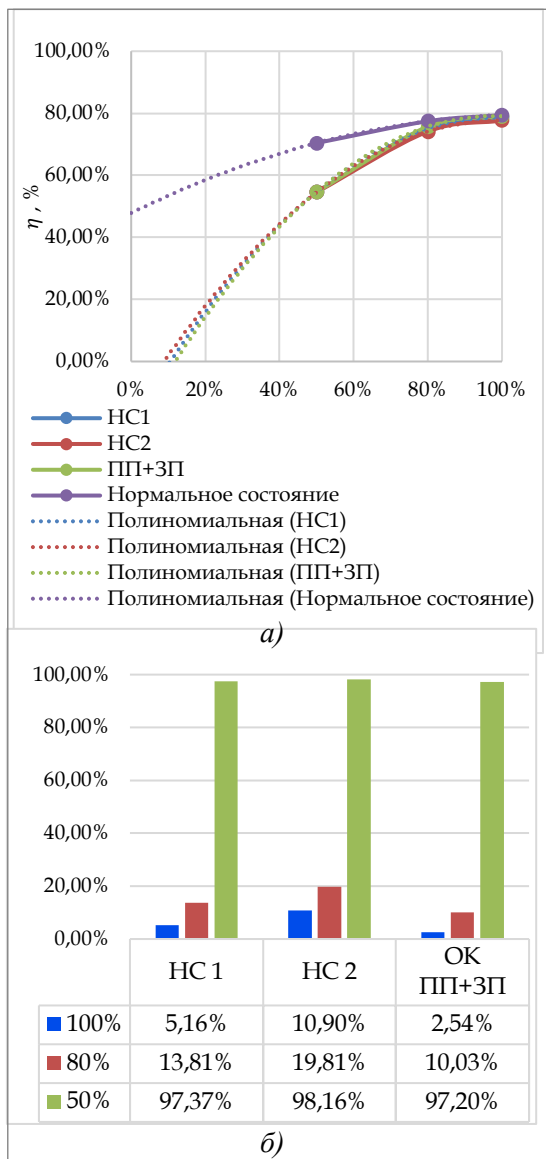


Рисунок 6 – Оценка вклада потерь при разных типах дефектов при вариации нагрузки: а) изменение КПД, б) прирост потерь мощности при наличии исследуемых дефектов относительно номинальных потерь

Таблица 1 – Результаты сравнения полученных амплитуд на расчетных частотах для двигателя АИР132М4

Состояние		$M_{ном}$	
		$f_d$	$A, дБ$
Нормальное	$f_d$	180	255
	$A, дБ$	-133,643	-63,7
Раковины (1)	$f_d$	180	255
	$A, дБ$	-128,516	-52,2
Раковины (3)	$f_d$	180	255
	$A, дБ$	-131,429	-55,9
Цветовые метки:		Определение дефекта не представляется возможным	
		Наблюдается изменение системы	
		Дефект определен	

Таблица 2 – Результаты сравнения полученных амплитуд на расчетных частотах для двигателя АИР80В4

Состояние		$M_{ном}$					X.X.				
		$f_d$	97	146	194	242	291	100	150	200	250
Нормальное	$f_d$	97	146	194	242	291	100	150	200	250	300
	$A, дБ$	-89,5	-59,4	-136	-85,5	-127	-121	-52,5	-132	-76,8	-126
Несоосность (1ст)	$f_d$	97	146	194	242	291	100	150	200	250	300
	$A, дБ$	-88,8	-53,5	-136	-76	-151	-77,2	-48,3	-133	-84,4	-146
Несоосность (2ст)	$f_d$	97	146	194	242	291	100	150	200	250	300
	$A, дБ$	-74,1	-52,3	-155	-76,2	-152	-61,1	-49	-127	-85,8	-139
Ослабление креплений	ПП	-		ПЛ	-		ПП+ЗП	-		ПЛ+ЗЛ	-

Таблица 3 – Результаты идентификации наличия дефектов методом сингулярного анализа для двигателя АИР80В4

Состояние	$M_{ном}$	X.X.
Нормальное	-	-
Несоосность (1ст)	$RC(G_i)$	$RC(G_i)$
Несоосность (2ст)	$RC(G_i)$	$RC(G_i)$
Ослабление креплений		
ПП	$RC(C_i)$	$RC(C_i)$
ПЛ	$RC(C_i)$	$RC(C_i)$
ПП+ЗП	$RC(C_i)$	$RC(C_i)$

Таблица 4 – Результаты идентификации наличия дефектов методом сингулярного анализа для двигателя АИР132М4

Состояние	$M_{ном}$
Нормальное	-
Раковины (1)	$RC(X_i)$
Раковины (3)	$RC(X_i)$

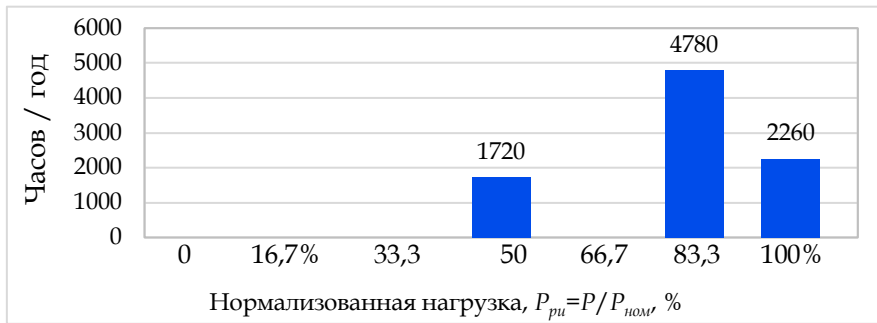


Рисунок 7 – Характерное распределение нагрузки для предприятий транспорта нефти, используемое в модели

Таблица 5 – Виды и период работ ТОиР для двигателей нефтегазовой отрасли рассматриваемого диапазона мощностей

Периоды проведения работ ТОиР, ч.							
ДК	3500-4000	ТО	700-800	Рт	7000-8000	Рк	25000-26000
Количество работ для двигателей N=12 и 15 лет соответственно							
	26 - 30		131 - 150		13 - 15		4 - 5
	33 - 38		164 - 188		16 - 19		4 - 5

Таблица 6 – Рассматриваемые в модели условия

Цена на э/э, руб./кВт·ч	1,2		1,7		2,5	
Ставка дисконтирования	5%		10%		15%	
Потери (прирост относительно потерь с наличием дефекта)	+1%	+5%	+10%	+50%	+100%	+200%
Сдвиг ТОиР	+20% к МРП		+10%		+5%	

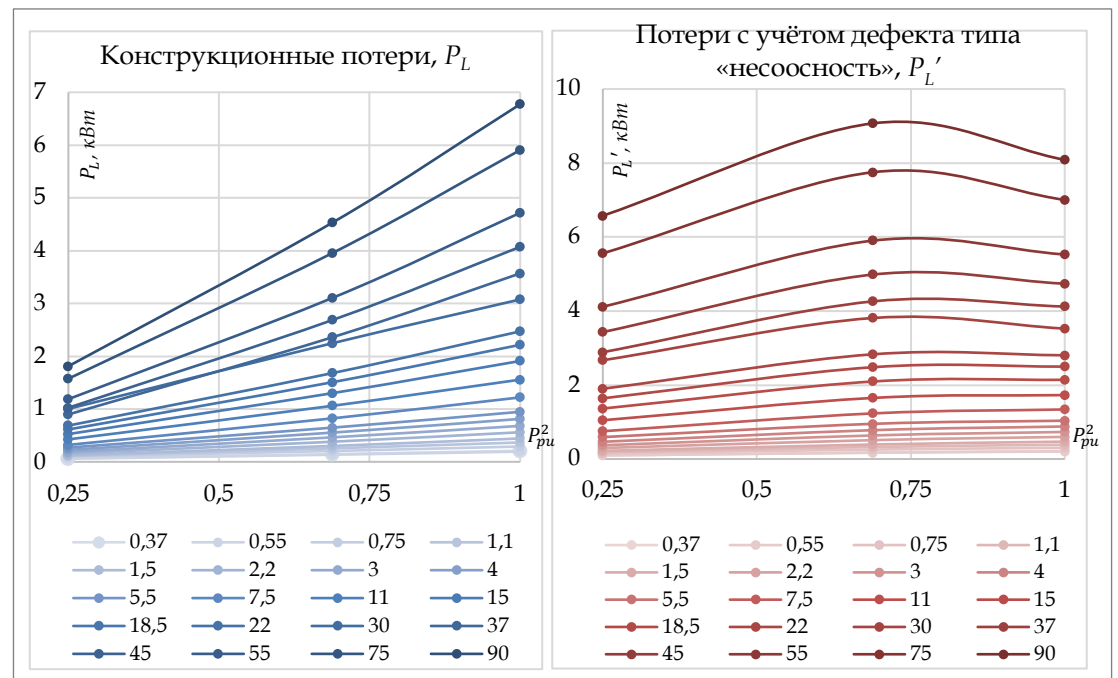


Рисунок 8 – Исследование изменения кривых конструкционных потерь с учетом потерь на техническое состояние для модельного ряда рассматриваемых двигателей типа ВА 0,37-90 кВт

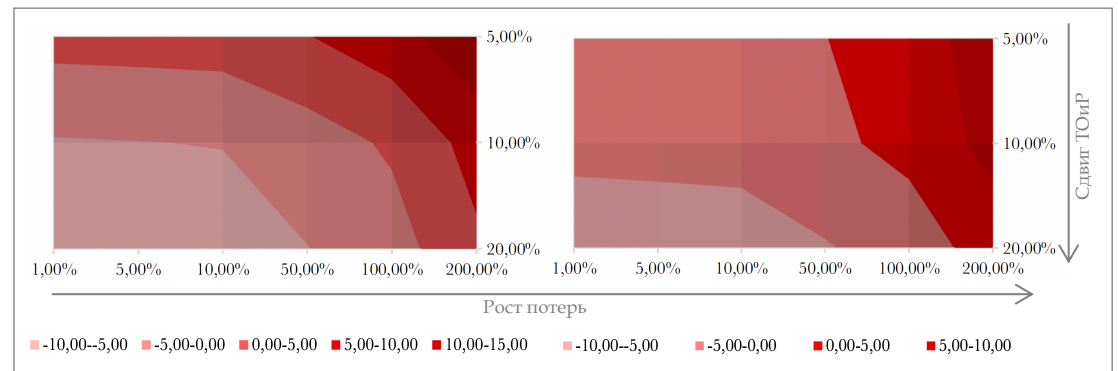


Рисунок 9 – Тепловые карты принятия решения по регулированию ТОиР в зависимости от потерь и LCC. Более светлая зона соответствует более эффективному регулированию, с учетом соблюдения  $\frac{|LCC_2|}{|LCC_{0=базовое}|} \leq 0$  и  $\frac{P_{L2}}{P_{ном}} < \theta$



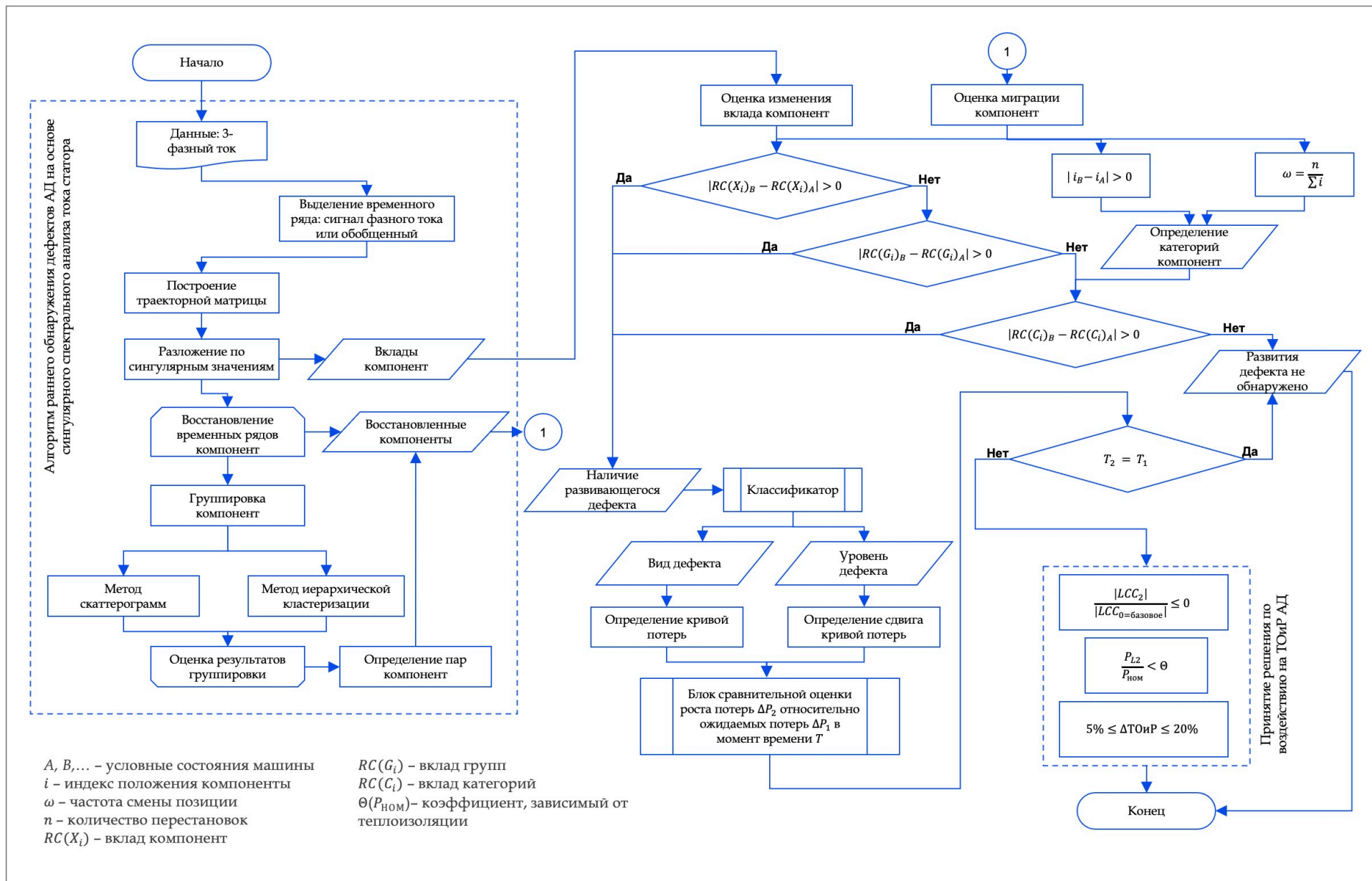


Рисунок 10 – Общая схема системы принятия решения на основе представленных алгоритмов сингулярного спектрального анализа применительно к току статора АД и воздействию на план ТОиР