

# К выбору методов мониторинга электроприводов энергетических объектов

Степанов С.Е.

АО “Транснефть – Верхняя Волга”  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
[stepanovse@nnov.transneft.ru](mailto:stepanovse@nnov.transneft.ru)

Крюков О.В.

АО “Гипрогазцентр”  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
[o.kryukov@ggc.nnov.ru](mailto:o.kryukov@ggc.nnov.ru)

**Аннотация.** Представлен анализ методов мониторинга приводных электродвигателей мощных энергоёмких объектов на примере электроприводных газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистрального транспорта газа. Предложена статистика технического состояния и безопасности функционирования приводных турбокомпрессоров на объектах ПАО “Газпром”. Рассмотрены эксплуатационные факторы, влияющие на надёжности изоляции статорных обмоток высоковольтных электродвигателей. Представлены аппаратные, методологические и алгоритмические средства оперативного мониторинга технического состояния и прогнозирования безаварийной работы синхронных двигателей. Показано, что внедрение современных и достоверных средств мониторинга технического состояния агрегатов и прогноза их ресурса на компрессорных станциях позволяет значительно снизить эксплуатационные расходы и повысить безопасность и безаварийность работы в штатных режимах, а также осуществить переход к техническому обслуживанию и ремонту по фактическому состоянию электроприводов электроэнергетических объектов.

**Ключевые слова:** опасный производственный объект, надёжность, система мониторинга, электроприводной газоперекачивающий агрегат, частичные разряды, встроенная система мониторинга и прогнозирования.

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно из теории надёжности [1-3], техническая диагностика как целенаправленно организуемый процесс направлена на исследование текущего состояния “объектов диагностирования и форм его проявления во времени, на разработку методов его определения и принципов построения систем диагностирования”. При этом технические средства, используемые на различных объектах диагностирования, отличаются разнообразием, поскольку диагностирование как функциональный процесс должно учитывать различие в формах практического состояния системы, целесообразность использования тех или иных методов определения работоспособности и поиска неисправности, а также принципиальные и конструктивные особенности технической реализации конкретных средств диагностирования.

Основной принцип диагностики состояния технических систем заключается в последовательном и систематическом измерении определенных параметров, выявлении их изменений в сравнении с штатными и дальнейшее прогнозирование. В [2-4] затронуты концептуальные проблемы, имеющиеся в сфере деятельности и области знаний, относящиеся к научной дисциплине под названием “техническая диагностика” в соответствии с ГОСТ 20911-89. В соответствии с общепринятой терминологией анализ

и сопоставление задач, сформированных производственной и научно-технической практикой процедур диагностирования технического состояния объектов, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Задачи технического диагностирования по ГОСТ 20911-89	Альтернативное представление задач диагностики (от низшего уровня к высшему)
Контроль технического состояния	Распознавание дефектов и мест их нахождения
Поиск места и определение причины отказа (неисправности)	Распознавание причин возникновения и развития дефектов
Прогнозирование технического состояния	Создание модели процесса развития дефекта
	Управление развитием выявленных дефектов
	Определение ресурса работоспособности
	Определение состава дефектов, устранение которых необходимо для восстановления требуемого ресурса работоспособности

Из перечисленных во втором столбце табл. 1 задач, в качестве важнейшей и в то же время целью диагностики, очевидно, является определение располагаемого (или остаточного) ресурса работоспособности агрегата. На основании этих данных можно решать задачи восстановления ресурса работоспособности и анализа путей и средств продления работоспособности. Поэтому главной задачей диагностики является сбор максимально возможной и достоверной информации о имеющихся дефектах, причинах и механизмах их развития, располагаемом ресурсе агрегата. Это позволяет дать рекомендации по ресурсосберегающим режимам эксплуатации, периодичности проведения и объёме мероприятий по контролю технического состояния с выработкой стратегии ресурсосбережения оборудования.

Рассмотренные задачи диагностики имеют определённую иерархичность и структуру взаимосвязи, представленную на рис. 1 для одного отдельно взятого дефекта. Интегральная же оценка технического состояния сложного оборудования формируется как совокупность оценок всех узлов с оценкой состояния набора подобных параллельных цепочек по каждому выявленному дефекту. Итоговый ресурс будет определяться наиболее быстро развивающимся и наименее поддающимся управлению дефекта по принципу “слабого звена”.



Рис. 1. Структура главных задач диагностики

Имея полную информацию о выявленных дефектах и взаимовлиянии их на остаточный ресурс, можно решить задачу анализа путей и средств доведения ресурса до требуемого уровня. Располагая знанием о причинах возникновения каждого дефекта и факторов, влияющих на его развитие, можно путем влияния на причины приостановить или замедлить развитие наиболее критичных дефектов, сберегая, таким образом, ресурс работоспособности агрегата.

Следует заметить, что задачи технического диагностирования имеют непосредственную связь с задачами теории управления и с методами, используемыми для описания и анализа систем [3,5-8], что определяет специфику исследований ЭГПА как объекта технического диагностирования, предполагая определение его характеристики с определенной точностью и адекватностью. Причем, результатом этого процесса должно быть заключение о техническом состоянии устройства с указанием места, а, при необходимости, вида и причины дефекта.

Задачи диагностирования при их организации и последующей прикладной реализации непосредственно связаны с формированием процессов наблюдения за контролируемыми параметрами с выбором способа съема информации, ее обработки, режимов работы используемых датчиков, распределение во времени интервалов наблюдения, а также определение интервалов их длительности. При обеспечении оптимального закона управления всей системой необходимо оптимизировать процесс наблюдения, а также организовать процесс диагностирования для мониторинга за качеством функционирования системы.

История развития методологии и алгоритмического обеспечения диагностических процедур систем мониторинга сложных технических агрегатов, включая мощные электроприводы, генераторы, трансформаторы и другие ответственные электроустановки, насчитывает более ста лет [1, 3, 9]. Она тесно связана с появлением и развитием новых электрических машин, совершенствованием датчиков, измерителей и преобразователей, а также вычислительных средств обработки и представления информации [10-14].

Однако только в последнее десятилетие проблемы достоверной оценки и продления ресурса безопасной эксплуатации электротехнических установок и машин приобрели исключительную актуальность во всех промышленно развитых странах [3,15-19]. Для России сегодня важность их решения обусловлена снижением объемов производства для восполнения выводимых их эксплуатации машин топливно-энергетического комплекса. При этом принципиально важно, что остаточный ресурс должен определяться с более высокой научно-методической точностью, чем проектный (теоретический) и исходный (в начале эксплуатации).

В настоящее время сформировались несколько концепций организации систем диагностирования на особо ответственных и сложных электроэнергетических объектах, к которым относятся ЭГПА [3, 20, 21]:

1) полностью встроенная в объект система диагностирования, при которой все элементы мониторинга (датчики, коммутационные элементы и устройства представления информации) размещены непосредственно в оборудовании;

2) полностью автономная система диагностирования, для которой характерна полная автономность всех узлов аппаратуры диагностирования;

3) промежуточные, компромиссные варианты размещения аппаратуры диагностирования на объекте. Используя широко известный принцип циклического опроса датчиков, для объекта исследования можно применить программный алгоритм наблюдения и диагностики, техническая реализация которого возможна с использованием микропроцессорной техники.

При этом особая роль отводится разработке оптимальной методики и процедурного математического аппарата формализации реальных процессов в объекте с целью достоверного и оперативного мониторинга его технического состояния. Подобная моделируемая система обычно представляется совокупностью дифференциальных, разностных, алгебраических и логических уравнений, которая с определенной точностью имитирует реальные процессы и может быть реализована на встроенных аппаратных средствах микропроцессорных систем управления (МПСУ) [22, 23].

Центральным элементом электроприводного ГПА, как объекта диагностирования, безусловно, является электродвигатель в совокупности со вспомогательным оборудованием и системами электроснабжения, коммутации и преобразования электроэнергии. На рис. 2 представлена схема классификации основных методов диагностирования технического состояния электрических машин большой мощности, применяемых для ЭГПА. В данной структуре представлены как известные и широко используемые методы, так и перспективные, экспериментально внедряемые в современные системы мониторинга.

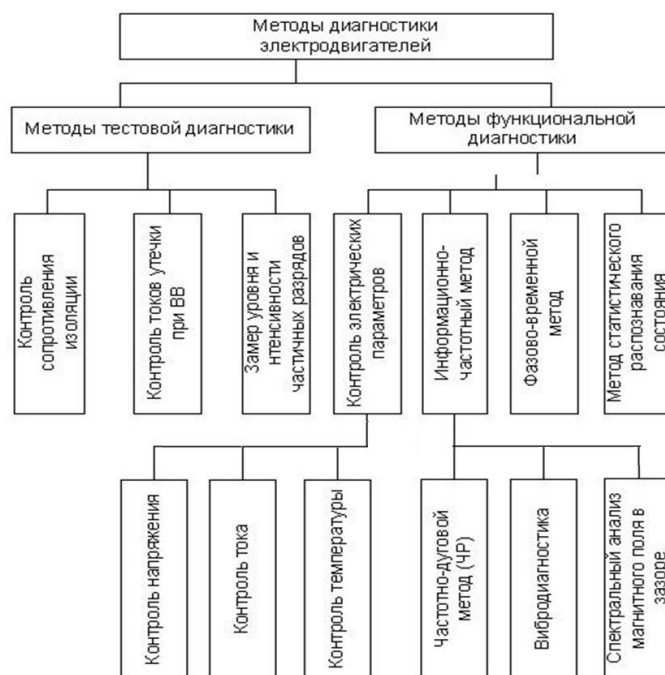


Рис. 2. Классификация методов диагностирования ЭГПА

Как известно [3-5], диагностирование электрических машин возможно только на основании априорных сведений, полученных:

- при проведении его автономных испытаний (режим off-line) – способы диагностики состояния, требующие прерывания рабочих режимов двигателя и вывода его из технологического процесса с возможным демонтажем;  
 - на основании информации об изменении параметров в процессе эксплуатации (режим on-line) – способы функциональной диагностики, осуществляемой непосредственно в процессе эксплуатации при работе в совокупности с другими агрегатами системы.

Для первой группы методов на ведущих моторостроительных и ремонтных предприятиях [3, 24] разработаны научно обоснованные и практически апробированные методы и программы испытаний различных электродвигателей с реализацией на стационарных автоматизированных испытательных стендах [25, 26]. Однако они могут быть применены только в рамках реализации стратегий технического обслуживания и ремонта (ТОИР) [27-29] электродвигателей в соответствии с плановыми регламентными работами ЭГПА [3, 30, 31]. Или же при создании машин [32-34] и совершенствовании их технических параметров, в первую очередь, качества изоляции статорных обмоток.

Для второй группы способов в настоящее время разработаны 4 основных метода диагностирования нарушений функционирования двигателей:

1. Статистический основан на известных вероятностных соотношениях между неисправностью (ее симптомами) и наблюдаемыми изменениями параметров, используя оценки функций правдоподобия методами байесовского анализа;
2. Детерминированный основан на анализе схемы технологического процесса (диагностируемого объекта) и выявлении тех точек, в которых необходимо проверить наличие симптомов нарушений;
3. Распознавание последовательности симптомов со сравнением реальной последовательности признаков нарушения с эталонными, хранимыми в базе знаний;
4. Создание полных объектно-ориентированных математических моделей диагностируемых объектов – наблюдаемое состояние относится к наиболее близкой модели идентификации.

Перечисленным выше методам диагностики присущи как преимущества, так и недостатки. Например, с помощью статистического метода невозможно оценивать техническое состояние оборудования в переходных режимах (пуск, останов, наброс и сброс нагрузки, стохастические возмущения со стороны сети, нагрузки и др.) поскольку он принципиально не работает в условиях неоднородной информации. Детерминированный подход “по определению” не позволяет контролировать машину в целом, адаптировать и обучать систему мониторинга при изменении внешних условий и режимов работы, носящих, как правило, случайный характер. Третья группа методов позволяет расширять базу последовательных признаков, однако, для его практической реализации необходимо хранить однотипные эталонные последовательности признаков и трудно представлять нецифровую (лингвистическую) информацию о происходящих процессах на основе нечеткой логики. Физически реализовать построение полных математических моделей для сложных параллельных процессов, происходящих, например, в синхронных машинах с достаточной для адекватности точностью, на сегодняшний день практически невозможно.

Рациональный выбор того или иного метода диагностирования зависит от множества конкретных требований к измерительной системе (оперативность и точность представления информации, возможность отказов каналов измерения и запаздывание при передаче) и режимов работы электрооборудования (наличие переходных процессов, параметров возмущений детерминированного и стохастического характера).

Так, например, в [35-37] предложена методика оценки технического состояния электрооборудования в режиме on-line на основе создания последовательности “нечетких” нелинейных регрессионных моделей с внешним входом (NARX). Для идентификации параметров модели (рис. 3) применена адаптивная нейро-нечеткая сеть, настроенная для исправного технического состояния электрооборудования с обучением и проверкой на основе выборок переходных процессов в формате COMTRADE.

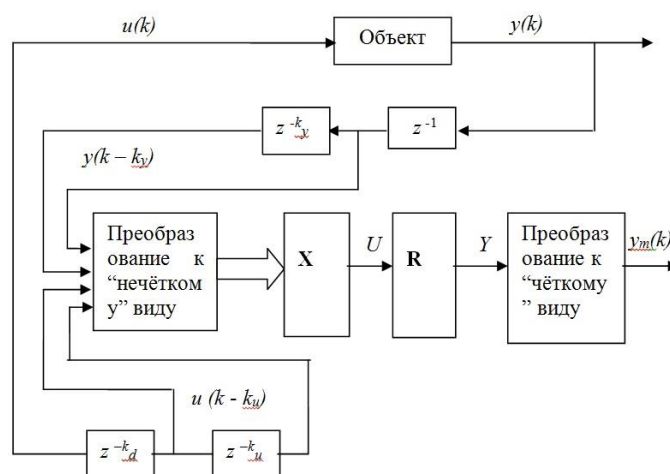


Рис. 3. “Нечёткая” модель объекта диагностики

Модель, изображенная на рис. 3, имеет статическую ошибку

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum [Y(k) - Y_m(k)]^2} \rightarrow \min \quad (1)$$

и устанавливает нелинейное преобразование между предыдущими значениями входов-выходов объекта и будущим, предсказываемым значением:

$$y(k) = F \{y(k-1), \dots, y(k-k_y), u(k-k_d), \dots, u(k-k_u)\}, \quad (2)$$

где  $k_y$  и  $k_u$  – максимальный шаг учитываемых предшествующих значений соответственно векторов выхода и входа системы;  $k_d$  – шаг запаздывания изменения вектора выхода по отношению к изменению вектора входа, определяемый свойствами объекта;  $F$  – “нечёткое” функциональное преобразование.

Полученные в [3] NARX-модели исправного технического состояния электроустановок являются одним из возможных решений задачи диагностирования технического состояния на основе создания экспертной системы и системы поддержки принятия технических решений в рамках АСУ ТП.

Вместо обработки огромного массива данных, связанных с реализацией предыдущего метода, в работах [38, 39] предложен аппарат кластерного анализа, представляющего собой совокупность методов для формирования однород-



ных классов в произвольной области больших объемов данных, которые применяются для неформализуемых или плохо формализуемых задач различной природы. При этом не используются априорные предположения о вероятностной природе исходной информации, а применяются эвристические соображения о свойствах процессов объекта.

После разделения исходных данных на группы с подобными свойствами (кластеры)  $x_{ji}$  определяются их соответствующие целевые функции. Алгоритмы субтрактивной нечёткой кластеризации образуются в результате оптимизации матрицы наблюдений  $X$ :

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Значения получаемых в результате кластерного анализа векторов параметров объекта позволяют измерить динамику развития процессов в каждой фазе электрической машины для оперативной оценки состояния изоляции.

При большом объеме анализируемых исходных данных в пакете приложений Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB предусмотрено использование графического интерфейса кластеризации, вызываемого с помощью команды "findcluster". Однако для реализации данной методики необходима регистрирующая аппаратура, позволяющая адекватно измерять параметры импульсов, а также разработанное на её основе ПО.

В продолжении этих исследований, в работах [40-42] рассмотрены методы диагностирования регулируемых асинхронных электроприводов на основе применения нейронных сетей, объединенных в систему принятия решений по идентификации различных дефектов и определению последовательности их диагностирования. Однако задачи синтеза, оптимизации числа фиксируемых переменных и выделения дефектов справедливы только для низковольтных асинхронных машин.

Предложен также комплекс методов диагностики высоковольтного трансформаторного оборудования под нагрузкой по данным измерений напряжений и токов обмоток для периодических (синусоидальных, несинусоидальных, с разными частотами) и переходных режимов. Математическая обработка диагностических моделей выполнена для режимов тестовой и функциональной диагностики. Для адекватной оценки текущего состояния трансформаторов организован сбор и рациональное использование информации о параметрах, интегрально характеризующих его техническое состояние.

При этом учёт точности и оперативности оценок параметров, тенденций изменения их отдельных составляющих и их корреляции позволяют не только повысить достоверность оценок текущего состояния трансформатора, но и спрогнозировать характер его изменения, идентифицировать и спрогнозировать развитие различных дефектов. Это особенно важно для быстроразвивающихся дефектов (типа замыканий в обмотках), когда мера ответственности и скорости принятия решений резко повышаются. Формально техника оценки и использования подобных сценариев достаточно хорошо разработана в теории искусственного интеллекта, однако достоинством работы

[41] является содержательное (конкретное) прикладное их наполнение с учетом особенностей функционирования трансформаторов, специфики их конкретного исполнения и статистики (базы данных) по неисправностям, дефектам и нештатным режимам.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на асинхронных двигателях [43-46] с контролем намагничивающего тока, активной мощности,  $\cos \phi$ , активных потерь в стержнях и вторичного напряжения позволили сделать вывод, что для оценки состояния стержней машины целесообразно контролировать активные потери в обмотке. Однако это является лишь единичным фактором оценки состояния двигателей.

В монографии [3] рассматривается также возможность применения достижений общетехнической диагностики контроля технического состояния объектов для получения и анализа диагностической информации электрических машин на основе использования приложений аналитической геометрии (диагностической меры расстояния, тополого-метрического разделения в пространстве признаков, отыскания площадей состояний и пр.). При этом в качестве диагностирующей информации используются данные натурно-экспериментальных исследований неисправностей в электрических машинах, проведенных по специальной методике.

Общая идея этой методики заключается в том, что, задавая отдельные неисправности искусственно в режимах холостого хода и наброса нагрузок, можно исследовать влияние их на параметры и характеристики электромагнитного, вибрационного и акустического процессов функционирования электрической машины.

В связи с тем, что МДС обмотки каждой фазы статора представляет собой сумму неподвижных в пространстве и пульсирующих во времени гармоник:

$$F_{\phi} = \sum F_{\phi v} \cdot \sin \omega t \cdot \cos v\alpha, \quad (4)$$

но в отличие от первой и ряда высших гармоник результирующая МДС от третьей гармоники и кратных ей в пространстве воздушного зазора отсутствует, то при замыканиях в обмотке статора образуется отдельный контур, в котором происходит частичная компенсация третьей гармоники. Это приводит к нарушениям вибрационных и акустических характеристик машины во всех её узлах, которые авторами метода проанализированы на действующих машинах, работающих на электростанциях, так и типовых образцах с предварительной проверкой их исправности.

Однако все исследования были проведены лишь на маломощных асинхронных двигателях, физические процессы в которых значительно отличаются от высоковольтных синхронных электродвигателей большой мощности, в которых для адекватного мониторинга, например, необходимо учитывать параметры частичных разрядов в статорных обмотках.

В работе [3], кроме рассмотренного, предложен метод построения систем диагностики, основными задачами которых являются распознавание состояния машины, дефектов её элементов и краткосрочное прогнозирование ресурса работоспособности в ходе оперативного управления. При этом в соответствии с методологией больших систем процесс управления представляется логической последовательностью событий вида

$$OU := \dots \Rightarrow KD_j \Rightarrow PP_{j+1} \Rightarrow UD_{j+1} \Rightarrow \dots, \quad (5)$$

состоящей из управляющих или контролируемых действий персонала (*УД*, *КД*) и совокупности процедур принятия решений (*ПР*) на производство очередного действия. При этом процесс принятия решений описывается в той же форме:

$$PP ::= \{Инф\} \Rightarrow РАСПОЗНАВАНИЕ \Rightarrow M \Rightarrow \{решения\} \Rightarrow ПРОГНОЗ \Rightarrow РЕШЕНИЕ. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что принятие управленческого решения включает в себя процедуры получения массива информации о состоянии объекта на момент принятия решения  $\{Инф\}$ , распознавание состояния и формирования на этой основе мысленной модели (*М*) ситуации, формирования массива возможных решений  $\{решения\}$ , прогнозирования на модели *М* изменения ситуации после реализации управляющего воздействия. При оперативной диагностике состояния объектов при различных управляющих и возмущающих воздействиях используются кибернетические модели систем поддержки принятия решений [4] с реализацией математического аппарата нечётких множеств. Однако отсутствие теоретического обоснования прикладных диагностических процедур с формализацией целей выбора *УД*, неприемлемой сложностью формализованного описания *М* и отсутствием экспертных представлений и пожеланий делают данную методику сегодня трудно реализуемой.

Обсуждается также комплекс исследований моделей и методов оптимизации процедур обработки диагностической информации на граф-моделях восстанавливаемых объектов с большим числом состояний при реализации допусковых методов контроля. Применение моделей классов эквивалентности диагностических пар позволяет генерировать эффективные алгоритмы построения процедур диагностирования на граф-моделях с большим числом возможных состояний – дефектов. Оптимизация объема обрабатываемой диагностической информации обеспечивает своевременность принятия управленческих решений с целью предотвращения аварийных ситуаций, автоматизация построения оптимальных процедур диагностирования дефектов позволяет существенно повысить эффективность проектирования контролепригодных систем. Однако данная методология является громоздкой и чересчур абстрактной и избыточной для электрических машин переменного тока.

Для оценки состояния изоляции электрических машин высокого напряжения в качестве основного признака технического состояния использован обобщенный индекс поляризации (*ТPI*). Он применен в качестве интегральной характеристики процессов поляризации, развивающихся в объёме изоляционных промежутков силового оборудования, позволяя повысить достоверность информации о состоянии промежутков и обеспечить однозначность получаемых оценок.

Данный подход является перспективным, т.к. позволяют обеспечить инженерные службы надёжным и эффективным инструментом при оценке состояния изоляции машин с помощью количественных оценок параметров индекса поляризации, коэффициентов диэлектрической абсорбции и разряда, времени релаксации и возвратного напряжения. Однако оценка эта делается с помощью си-

стемы таблиц, а результат каждого отдельного вида тестирования даёт лишь собственное необъективное видение дальнейшей перспективы относительно состояния машины. Совокупность же результатов комбинации нескольких одновременно используемых видов тестирования из-за большого числа случайных факторов приводит к плохо интерпретируемой картине дальнейшего прогноза состояния машины.

#### Выводы

1. Анализ методов диагностики показывает необходимость для компенсации недостатков различных методов мониторинга состояния ЭГПА использовать систему комплексного мониторинга двигателя, математический аппарат которой совмещает несколько взаимодополняющих методов. Например, энергетический подход, позволяющий контролировать режим работы двигателя и прогнозировать техническое состояние его изоляции, нужно совместить с методами вибродиагностики, которая позволяет прогнозировать возникновение механических дефектов в конструкции агрегата.

2. Обобщение отечественного и зарубежного опыта создания современных систем диагностирования ЭГПА позволяет определить в качестве основных тенденций организацию многоканальных систем ВСМП с открытой архитектурой, обеспечивающей возможность наращивания и модернизации их структур.

3. При рассмотрении ВСМП с позиции системной методологии, то есть в виде совокупности однородных и идентичных подсистем, замкнутых позиционными обратными связями, циклически работающими на одну нагрузку, открываются дополнительные возможности, как для формирования особых управляющих функций, так и для организации процессов наблюдения и диагностирования технического состояния синхронной машины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пархоменко П.П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян. – М.: Энергия, 1981. – 320 с.
2. Аракелян В.Г. Цели, понятия и общие принципы диагностического контроля // Электротехника. – 2002. – №5. – С. 2-9.
3. Пужайло А.Ф. Диагностика оборудования компрессорных станций: монография серии “Научные труды к 45-летию АО “Гипрогазцентр” / А.Ф. Пужайло, С.В. Савченков, О.В. Крюков и др. – Нижний Новгород: Исток, 2013. – Т. 2. – 300 с.
4. Милов В.Р. Процедуры прогнозирования и принятия решений в системе технического обслуживания и ремонта / В.Р. Милов, И.В. Шалашов, О.В. Крюков // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 8. – С.47-49.
5. Аникин Д.А. Проектирование систем управления электроприводными ГПА / Д.А. Аникин, И.Е. Рубцова, О.В. Крюков, Н.В. Киянов // Газовая промышленность. – 2009. – №2. – С. 44-47.
6. Степанов С.Е. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газоконпрессорных станций / С.Е. Степанов, О.В. Крюков, А.С. Плехов // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 29-31.

7. Крюков О.В. Частотное регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – №6. – С. 39-43.
8. Крюков О.В. Оптимизация работы технологически связанных электроприводов газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т.1, №2. – С. 26-31. DOI: 10.24892/RIJEE/20140206
9. ГОСТ 11826-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
10. Крюков О.В. Интеллектуальные электроприводы с IT-алгоритмами // Автоматизация в промышленности. 2008. – №6. – С. 36-39.
11. Бабичев С.А. Автоматизированная система безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов / С.А. Бабичев, О.В. Крюков, В.Г. Титов // Электротехника. – 2010. – №12. – С. 24-31. DOI: 10.3103/S1068371210120047
12. Крюков О.В. Пути модернизации электроприводных газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков, С.Е. Степанов // Електромеханічні І енергозберігаючі системи. – 2012. – №3(19). – С. 209-212.
13. Захаров П.А. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2009. – №5. – С. 64-70..
14. Крюков О.В. Тензометрические датчики момента с микропроцессорным вычислителем // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. – №2. – С. 25-29.
15. Kryukov O.V. Intelligent electric drives with IT algorithms // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol.74, №6. – P. 1043-1048. DOI: 10.1134/S0005117913060143
16. Babichev S.A. Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units / S.A. Babichev, P.A. Zakharov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol.72, №1. – P. 175-180. DOI: 10.1134/S0005117911010176
17. Babichev S.A. Automated safety system for electric driving gas pumping units / S.A. Babichev, O.V. Kryukov, V.G. Titov // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol.81, №12. – P. 649-653. DOI: 10.3103/S1068371210120047
18. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – P. 135-138. DOI: 10.3103/S1068371213030085
19. Babichev S.A. Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units / S.A. Babichev, E.V. Bychkov, O.V. Kryukov // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Т.81. – С. 489-492. DOI: 10.3103/S1068371210090075
20. Крюков О.В. Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, В.Г. Титов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – №2. – С. 5-10.
21. Крюков О.В. Научное обоснование путей модернизации ЭГПА // Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. – 2013. – №36. – С. 133-134.
22. Крюков О.В. Моделирование и микропроцессорная реализация электромеханических систем // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т.2, №3. – С. 55-61. DOI: 10.24892/RIJEE/20150309
23. Крюков О.В. Мультипроцессорные системы управления автоматизированным электроприводом объектов газотранспортных систем // Газовая промышленность. – 2014. – №11(714). – С. 60-63.
24. Киянов Н.В. Автоматизированный стенд для обкатки и испытаний автотракторных двигателей / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, В.Г. Титов // Автоматизация в промышленности. – 2009. – №6. – С. 52-57.
25. Крюков О.В. Применение микропроцессорной техники в нагружающих устройствах / О.В. Крюков, В.П. Леонов, О.В. Федоров // Двигателестроение. – 1987. – №7. – С. 33-35.
26. Крюков О.В. Нагружающее устройство для обкатки и комплексных испытаний приводных двигателей // Компрессорная техника и пневматика. – 2014. – №5. – С. 28-32.
27. Захаров П.А. Мониторинг и прогнозирование технического состояния ЭГПА КС ПХГ / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Газовая промышленность. – 2013. – №700. – С. 113-120.
28. Крюков О.В. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций / О.В. Крюков, Д.Г. Репин // Газовая промышленность. – 2014. – №712. – С. 84-87.
29. Серебряков А.В. Пути перехода на техническое обслуживание и ремонт электроприводных газоперекачивающих агрегатов по фактическому состоянию / А.В. Серебряков, О.В. Крюков // Газовая промышленность. – 2015. – №10. – С. 83-86.
30. Бабичев С.А. Анализ технического состояния и безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов / С.А. Бабичев, Е.В. Бычков, О.В. Крюков // Электротехника. – 2010. – №9. – С. 30-36. DOI: 10.3103/S1068371210090075
31. Бабичев С.А. Мониторинг технического состояния приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов / С.А. Бабичев, П.А. Захаров, О.В. Крюков // Контроль. Диагностика. – 2009. – №7. – С.33-39.
32. Крюков О.В. Анализ моноблочных конструкций электрических машин для газоперекачивающих агрегатов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т.3, № 4. – С. 53-58. DOI: 10.24892/RIJEE/20150409
33. Крюков О.В. Формализация факторов старения изоляции приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Приводная техника. – 2012. – №1. – С. 12-23.
34. Крюков О.В. Устройство для контроля изоляции электродвигателя // Патент России на полезную модель №121939. 2012.
35. Крюков О.В. Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы асинхронных электроприводов // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2005. – №6. – С. 43-46.
36. Крюков О.В. Комплексная система мониторинга и управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами // Передовые информационные технологии,



средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях: сб. тр. Междунар. научн.-практ. конф. АИТА-2011. – М., 2011. – С. 329-350.

37. Захаров П.А. Встроенная система диагностирования и прогнозирования электроприводных газоперекачивающих агрегатов / П.А. Захаров, О.В. Крюков, Н.В. Киянов // Контроль. Диагностика. – 2008. – №11. – С. 43-49.

38. Хлынин А.С. Реализация факторов энергоэффективности электроприводных газоперекачивающих агрегатов в проектах / А.С. Хлынин, О.В. Крюков // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т.1, №2, – С. 32-37. DOI: 10.24892/RIJEE/20140207

39. Крюков О.В. Средства и методы прогнозирования состояния электроприводов турбокомпрессоров // Електромеханічні І енергозберігаючі системи. – 2012. – №3(19). – С. 512-515.

40. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol.83. – P. 516-519. DOI: 10.3103/S1068371212090064

41. Рубцова И.Е. Нейро-нечеткие модели и алгоритмы управления и мониторинга синхронных машин большой

мощности / И.Е. Рубцова, О.В. Крюков, С.Е. Степанов // Управление и информационные технологии: материалы 6-й научной конференции УИТ-2010. – СПб.: ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, 2010. – С. 160-162.

42. Крюков О.В. Методология и средства нейронечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2012. – №9. – С. 52-57. DOI: 10.3103/S1068371212090064

43. Бабичев С.А. Автоматизированная система оперативного мониторинга приводных двигателей газоперекачивающих агрегатов / С.А. Бабичев, П.А. Захаров, О.В. Крюков // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 6. – С. 3-6. DOI: 10.1134/S0005117911010176

44. Крюков О.В. Комплексный анализ условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 4. – С. 14-18.

45. Крюков О.В. Моделирование факторов старения изоляции приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – №5. – С. 33-37.

DOI: 10.24892/RIJEE/20150407

## To a Choice of Methods of Monitoring of Electric Drives of Power Objects

Stepanov S.E.

JSC “Transneft – Verhnyaya Volga”  
Nizhniy Novgorod, Russian Federation  
[StepanovSE@nnov.transneft.ru](mailto:StepanovSE@nnov.transneft.ru)

**Abstract.** The analysis of methods of monitoring of driving electric motors of strong power-intensive objects on the example of electric driving gas-distributing units of compressor stations of the main transport of gas is submitted. The statistics of technical condition and safety of functioning of driving turbocompressors on objects of PJSC Gazprom is offered. The operational factors influencing on reliability of isolation the stator windings of high-voltage electric motors are considered. Hardware, methodological and algorithmic means of expeditious monitoring of technical condition and forecasting of trouble-free operation of synchronous motors are presented. It is shown that introduction of modern and reliable monitors of technical condition of units and the forecast of their resource at compressor stations allows to cut considerably operational costs and to increase safety and fail-safety of work in the regular modes, and also to carry out transition to maintenance and repair on an actual state of electric drives of electrical power objects.

**Keywords:** hazardous production facility, reliability, system of monitoring, electric driving gas-distributing unit, partial categories, built-in system of monitoring and forecasting.

### REFERENCES

1. Parkhomenko P.P., Sogomonyan Ye.S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparatur-nyye sredstva)* [Fundamentals of technical diagnos-

Kryukov O.V.

JSC “Giprogazcenter”  
Nizhniy Novgorod, Russian Federation  
[o.kryukov@ggc.nnov.ru](mailto:o.kryukov@ggc.nnov.ru)

tics (optimization algorithms for diagnosis, instrumental means)], Moscow, Energiya, 1981, 320 p. (in Russ.)

2. Arakelyan V.G. Goals, concepts and general principles of diagnostic monitoring [Tseli, ponyatiya i obshchiye printsipy diagnosticheskogo kontrolya], *Elektrotekhnika [Electrical Engineering]*, 2002, no. 5, pp. 2-9. (in Russ.)

3. Puzhaylo A.F., Savchenkov S.V., Kryukov O.V. and etc. *Diagnostika oborudovaniya kompressornykh stantsiy: monografiya* [Diagnosis of compressor stations: monograph], Nizhniy Novgorod, Istok, vol. 2, 300 p. (in Russ.)

4. Milov V.R., Shalashov I.V., Kryukov O.V. Forecasting procedures and decision-making system maintenance and repair [Protседury prognozirovaniya i prinyatiya resheniy sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation of industry]*, 2010, no.8, pp.47-49. (in Russ.)

5. Anikin D.A., Rubtsova I.Ye., Kryukov O.V., Kiyanov N.V. Design of control systems electrically driven gas pumping units [Proyektirovaniye sistem upravleniya elektroprivodnymi GPA], *Gazovaya promyshlennost [Gas Industry]*, 2009, no. 2, pp. 44-47. (in Russ.)

6. Stepanov S.Ye., Kryukov O.V., Plekhov A.S. The principles of automatic control excitation of synchronous machines gas compressor stations [Printsipy avtomaticheskogo upravleniya vzbuzhdeniyem sinkhronnykh mashin gazokompres-

sornykh stantsiy], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation of industry]*, 2010, no.6, pp. 29-31. (in Russ.)

7. Kryukov O.V. Frequency control performance of electrically driven gas pumping units [Chastotnoye regulirovaniye proizvodni-telnosti elektroprivodnykh gazoperekachivayushchikh agregatov], *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont [Electric equipment: operation and repair]*, 2014, no. 6, pp. 39-43. (in Russ.)

8. Kryukov O.V. Work optimization of technologically interconnected gas compressor units' electric drives of compressor stations, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 26-31. (in Russ.). DOI: 10.24892/RIJEE/20140206

9. GOST 11826-86. *Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiyesya. Obshchiye metody ispytaniy [GOST 11826-86. Rotating electrical machines. Common test methods]*, Moscow, Standards Publishing House, 1987. (in Russ.)

10. Kryukov O.V. Intelligent actuators with IT-algorithms [Intellektualnyye elektroprivody s IT-algoritmami], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation of industry]*, 2008, no. 6, pp. 36-39. (in Russ.)

11. Babichev S.A., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated security electrically driven gas pumping units [Avtomatizirovannaya sistema bezopasnosti elektroprivodnykh gazoperekachivayushchikh agregatov], *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2010, no. 12, pp. 24-31. (in Russ.). DOI: 10.3103/S1068371210120047

12. Kryukov O.V. Ways of modernization of electrically driven gas pumping units [Puti modernizatsii elektroprivodnykh gazoperekachivayushchikh agregatov], *Yeletromekhanichni I yenergozberigayuchi sistemi [Electrical and energy saving systems]*, 2012, no. 3(19), pp. 209-212. (in Russ.)

13. Zakharov P.A., Kryukov O.V. The methodology of the invariant control units of compressor stations at random actions [Metodologiya invariantnogo upravleniya agregatami kompressornykh stantsiy pri sluchaynykh vozdeystviyakh], *Izvestiya VUZov. Elektromekhanika [Proceedings of the universities. Electromechanics]*, 2009, no. 5, pp. 64-70. (in Russ.)

14. Kryukov O.V. Strain gauges moment microprocessor calculator [Tenzometricheskoye datchiki momenta s mikroprotssessornym vychislitelem], *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika [Compressor equipment and pneumatics]*, 2015, no. 2, pp. 25-29. (in Russ.)

15. Kryukov O.V. Intelligent electric drives with IT algorithms, *Automation and Remote Control*, 2013, vol. 74, no. 6, pp. 1043-1048. DOI: 10.1134/S0005117913060143

16. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units, *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 1, pp. 175-180. DOI: 10.1134/S0005117911010176

17. Babichev S.A., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units, *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, no. 12, pp. 649-653. DOI: 10.3103/S1068371210120047

18. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations, *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, pp. 135-138. DOI: 10.3103/S1068371213030085

19. Babichev S.A., Bychkov E.V., Kryukov O.V. Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units, *Rus-*

*sian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, pp. 489-492. DOI: 10.3103/S1068371210090075

20. Kryukov O.V., Stepanov S.Ye., Titov V.G. Embedded systems technical condition monitoring of electric energy security for the transport of gas [Vstroyennyye sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya elektroprivodov dlya energeticheskoy bezopasnosti transporta gaza], *Energobezopasnost i energosberezheniye [Energy security and energy efficiency]*, 2012, no. 2, pp. 5-10. (in Russ.)

21. Kryukov O.V. Scientific substantiation of ways to modernize the electric motor driven gas pumping units [Nauchnoye obosnovaniye putey modernizatsii EGPA], *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo uni-versiteta Kharkovskiy politekhnicheskoy institute [Bulletin of the National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute]*, 2013, no. 36, pp. 133-134. (in Russ.)

22. Kryukov O.V. Modeling and microprocessor implementation of electromechanical systems, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 55-61. (in Russ.). DOI: 10.24892/RIJEE/20150309

23. Kryukov O.V. Multiprocessor control system of automated electric facilities of gas transmission systems [Multiprotssessornyye sistemy upravleniya avtomatizirovannym elektroprivodom ob'yektov gazotransportnykh sistem], *Gazovaya promyshlennost [Gas industry]*, 2014, no. 11(714), pp. 60-63. (in Russ.)

24. Kiyonov N.V., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated stand for running and testing of automotive engines [Avtomatizirovanny stend dlya obkatki i ispytaniy avtotraktornykh dvigateley], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation of Industry]*, 2009, no. 6, pp. 52-57. (in Russ.)

25. Kryukov O.V., Leonov V.P., Fedorov O.V. The use of microprocessor technology in the loading device [Primeneniye mikroprotssessornoy tekhniki v nagruzhayushchikh ustroystvakh], *Dvigatelistroyeniye [Engine Construction]*, 1987, no. 7, pp. 33-35. (in Russ.)

26. Kryukov O.V. Loading device for running and complex tests of the drive motors [Nagruzhayushcheye ustroystvo dlya obkatki i kompleksnykh ispytaniy privodnykh dvigateley], *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika [Compressor equipment and pneumatics]*, 2014, no. 5, pp. 28-32. (in Russ.)

27. Zakharov P.A., Kryukov O.V. Monitoring and forecasting of technical condition GPA COP UGS [Monitoring i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya EGPA KS PKhG], *Gazovaya promyshlennost [Gas Industry]*, 2013, no. 700, pp. 113-120. (in Russ.)

28. Kryukov O.V., Repin D.G. Rack systems operational monitoring of the technical condition of power plants for the energy security of compressor stations [Sistemy operativnogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya energostanovok dlya energeticheskoy bezopasnosti kompressornykh stantsiy], *Gazovaya promyshlennost [Gas Industry]*, 2014, no. 712, pp. 84-87. (in Russ.)

29. Serebryakov A.V., Kryukov O.V. The transition to the maintenance and repair of electrically driven gas pumping units of the actual state [Puti perekhoda na tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont elektroprivodnykh gazoperekachivayushchikh agregatov po fakticheskomu sostoyaniyu], *Gazovaya promyshlennost [Gas Industry]*, 2015, no. 10, pp. 83-86. (in Russ.)



30. Babichev S.A., Bychkov Ye.V., Kryukov O.V. Analysis of the technical condition and safety of electrically driven gas pumping units [Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya i bezopasnosti elektroprivodnykh gazoperekachivayushchikh agregatov], *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2010, no. 9, pp. 30-36. (in Russ.). DOI: 10.3103/S1068371210090075

31. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. Monitoring of the technical condition of the drive motors of gas pumping units [Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya privodnykh elektrodvigateley gazoperekachivayushchikh agregatov], *Kontrol. Diagnostika [Control. Diagnostics]*, 2009, no. 7, pp.33-39. (in Russ.)

32. Kryukov O.V. Analysis designs of electric mashines for gas pumping units, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 53-58. (in Russ.). DOI: 10.24892/RIJIE/20150409

33. Kryukov O.V. The formalization of the factors of aging insulation drive motors of gas pumping units [Formalizatsiya faktorov stareniya izolyatsii privodnykh elektrodvigateley gazoperekachivayushchikh agregatov], *Privodnaya tekhnika [Drive Technology]*, 2012, no. 1, pp. 12-23. (in Russ.)

34. Kryukov O.V. *Ustroystvo dlya kontrolya izolyatsii elektrodvigateley* [The device for controlling the motor insulation], Patent RU 21939, 2012. (in Russ.)

35. Kryukov O.V. Built-in diagnostics and forecasting work asynchronous electric [Vstroyennaya sistema diagnostirovaniya i prognozirovaniya raboty asinkhronnykh elektro-privodov], *Izvestiya VUZov. Elektromekhanika [Proceedings of the universities. Electromechanics]*, 2005, no.6, pp. 43-46. (in Russ.)

36. Kryukov O.V. Comprehensive system monitoring and management of electrically driven gas pumping units [Kompleksnaya sistema monitoringa i upravleniya elektroprivodnyimi gazoperekachivayushchimi agregatami], *Peredovyye informatsionnyye tekhnologii, sredstva i sistemy avtomatizatsii i ikh vnedreniye na rossiyskikh predpriyatiyakh: sb. tr. Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. [Proc. International scientific and practical conference "Advanced information technology, automation means and systems and their implementation at the Russian enterprises"]*, Moscow, 2011, pp. 329-350. (in Russ.)

37. Zakharov P.A., Kryukov O.V., Kiyanov N.V. Built-in diagnostics and forecasting of electrically driven gas pumping units [Vstroyennaya sistema diagnostirovaniya i prognozirovaniya elektroprivodnykh gazoperekachi-vayushchikh agregatov], *Kontrol. Diagnostika [Control. Diagnostics]*, 2008, no. 11, pp. 43-49.

38. Khlynin A.S., Kryukov O.V. Realization of energy Efficiency factors of electrically driven gas compressor units in

projects, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 32-37. (in Russ.). DOI: 10.24892/RIJEE/20140207

39. Kryukov O.V. The means and methods of forecasting the state of electric turbochargers [Sredstva i metody prognozirovaniya sostoyaniya elektroprivodov turbokompresorov], *Yeletromekhanichni I yenergozberigayuchi sistemi [Electrical and energy saving systems]*, 2012, no. 3(19), pp. 512-515. (in Russ.)

40. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units, *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, pp. 516-519. DOI: 10.3103/S1068371212090064

41. Rubtsova I.Ye., Kryukov O.V., Stepanov S.Ye. Neuro-fuzzy models and algorithms for control and monitoring of high power synchronous machines [Neyro-nechetkiye modeli i algoritmy upravleniya i monitoringa sinkhronnykh mashin bolshoy moshchnosti], *Sbornik trudov XII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya [Proc. of the XII All-Russian conference on control problems]*, Moscow, Institut problem upravleniya RAN, 2014, pp. 160-162. (in Russ.)

42. Kryukov O.V. The methodology and tools of neuro-fuzzy prediction state electric gas pumping units [Metodologiya i sredstva neyro-nechetkogo prognozirovaniya sostoyaniya elektroprivodov gazoperekachivayushchikh agregatov], *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2012, no. 9, pp. 52-57. (in Russ.). DOI: 10.3103/S1068371212090064

43. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. Automated system for operational monitoring of the drive motors of gas pumping units [Avtomatizirovannaya sistema operativnogo monitoringa privodnykh dvigateley gazoperekachivayushchikh agregatov], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation Industry]*, 2009, no. 6, pp. 3-6. (in Russ.). DOI: 10.1134/S0005117911010176

44. Kryukov O.V. Comprehensive analysis of the operating conditions of electric gas pumping units [Kompleksnyy analiz usloviy ekspluatatsii elektrodvigateley gazoperekachivayushchikh agregatov], *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika [Compressor equipment and pneumatics]*, 2013, no. 4, pp. 14-18. (in Russ.)

45. Kryukov O.V. Modeling aging factors drive motors insulation of gas pumping units [Modelirovaniye faktorov stareniya izolyatsii privodnykh elektrodvigateley gazoperekachivayushchikh agregatov], *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika [Compressor equipment and pneumatics]*, 2013, no. 5, pp. 33-37. (in Russ.)

#### Библиографическое описание статьи

Степанов С.Е. К выбору методов мониторинга электроприводов энергетических объектов / С.Е. Степанов, О.В. Крюков // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т.2, №4. – С. 53-61. DOI: 10.24892/RIJEE/20150407

#### Reference to article

Stepanov S.E., Kryukov O.V. To a choice of methods of monitoring of electric drives of power objects, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol.2, no.4, pp. 53-61. DOI: 10.24892/RIJEE/20150407