

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-52-83:656.56

Алексей Руфимович Колганов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: alex_37@list.ru

Олег Викторович Крюков

ООО «ТСН-электро», доктор технических наук, доцент, заместитель директора по науке, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Александр Васильевич Саушев

ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода и электрооборудования береговых установок, Россия, Санкт-Петербург, телефон (812) 748-96-85, e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru

Формализация термодинамических процессов в автоматизированных электроприводах компрессорных установок

Авторское резюме

Состояние вопроса. Основными причинами возникновения аварийных ситуаций на компрессорных станциях магистральных газопроводов является перегрев обмоток статоров приводных электродвигателей центробежных турбокомпрессоров. Данное явление обусловлено тем, что эксплуатация всех электрических двигателей на компрессорных станциях основана на упрощенных общепромышленных моделях, не учитывающих всю гамму стохастических возмущений и частую работу в неоптимальных режимах. Это приводит к снижению ожидаемых показателей энергоэффективности и надежности, значительно влияя на количество нарушений нормативно-технических требований эксплуатации. В связи с этим создание научно-обоснованных моделей функционирования и адаптации работы мощных автоматизированных электроприводов на компрессорных станциях является актуальной задачей.

Материалы и методы. Основой формализации термодинамических процессов в мощных синхронных машинах является аппарат теории планирования эксперимента и трехступенчатая теория нагрева на базе физической картины процесса нагрева синхронного двигателя как системы, состоящей из трех взаимосвязанных в тепловом отношении тел.

Результаты. Предложена математическая модель мощного электродвигателя с вентиляторной нагрузкой, позволяющая повысить точность идентификации термодинамических процессов в автоматизированном электроприводе газоперекачивающих агрегатов, благодаря чему обеспечивается адекватность оценки надежности и энергоэффективности магистральных газопроводов и стабилизация на оптимальном уровне всех параметров перекачиваемого газа газотранспортной системы.

Выводы. Использование формализованного подхода к моделированию процессов в мощных электроприводах компрессорной станции на основе трехступенчатой теории нагрева позволяет учесть и скомпенсировать все внешние возмущения и стабилизировать работу магистрального газопровода на теоретически обоснованном оптимальном по энергетическим критериям уровне.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, автоматизированный электропривод, теория нагрева, инвариантная система, термодинамические процессы

Alexey Rufimovich Kolganov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electric Drive and Industrial Installations Automation Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-09, e-mail: alex_37@list.ru

Oleg Viktorovich Kryukov

TCN-Electro LLC, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree, Associate Professor, Deputy Director for Science, Russia, Nizhny Novgorod, telephone (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Alexander Vasilyevich Saushev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor, Head of Electric Drives and Electrical Equipment for Onshore Installations Department, Russia, Saint-Petersburg, telephone (812) 748-96-85, e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru

Formalization of thermodynamic processes in automated electric drives of compressor units

Abstract

Background. The main causes of emergencies at compressor stations of main gas pipelines are overheating of stator windings of drive electric motors of centrifugal turbo-compressors. This phenomenon occurs due to the fact that the operation of all electric motors at compressor stations is based on simplified general industrial models that do not take into account the entire gamut of stochastic disturbances and frequent operation in suboptimal modes. This leads to a decrease of the expected indicators of energy efficiency and reliability, significantly affecting the number of violations of regulatory technical requirements for operation. Therefore, an urgent task is to develop scientifically substantiated models of the functioning and adaptation of the operation of powerful automated electric drives at compressor stations.

Materials and methods. The basis of the formalization of thermodynamic processes in powerful synchronous machines is the theory of experimental planning and the three-stage theory of heating based on the physics of the process of heating of synchronous motor as a system consisting of three thermally interconnected bodies.

Results. A mathematical model of a powerful electric motor with a fan load has been proposed. It makes possible to increase the accuracy of identification of thermodynamic processes in an automated electric drive of gas pumping units. Due to this, the adequacy of the assessment of the reliability and energy efficiency of trunk gas pipelines is ensured and all parameters of the pumped gas transmission system are stabilized at the optimal level.

Conclusions. The use of a formalized approach to modeling processes in powerful electrical drives of the compressor station based on a three-stage heating theory makes it possible to take into account and compensate all external disturbances and stabilize the operation of the main gas pipeline at a theoretically reasonable optimal level according to energy criteria.

Key words: gas pumping unit, automated electric drive, heating theory, invariant system, thermodynamic processes

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.3.068-076

Введение. Современный этап развития аппаратной базы систем автоматизации и компьютерных технологий позволяет реализовывать все новые возможности безаварийной эксплуатации не только отдельных видов оборудования или автономных объектов, но и сложных систем в целом, к которым можно отнести компрессорные станции (КС) магистральных газопроводов (МГ) ПАО «Газпром» [1–3]. АСУ КС призваны решать главные задачи транспорта газа – повышение надежности, долговечности работы МГ, энергетической эффективности и безопасности эксплуатации сложного и дорогостоящего технологического оборудования. В связи с этим процессу совершенствования мониторинга КС и реализации автоматизированных систем контроля, управления и диагностики на основе компьютерной техники на базе современных систем электроснабжения уделяется большое внимание (рис. 1) [4–6].

Требования к оснащению системами мониторинга основного технологического оборудования КС содержатся во многих отраслевых нормативных документах [7–9]. Правила эти регламентируют осуществление контроля работоспособности, надежности и безопасности оборудования КС с помощью технических и программных средств мониторинга, которые должны с требуемой достоверностью производить оценку технического состояния оборудования КС и прогнозировать его изменение не менее чем за период до следующих измерений. Установка систем мониторинга и прогнозирования должна обеспечиваться при строительстве новых и реновации существующих компрессорных станций, а также в процессе модернизации эксплуатируемых КС. Вводимые в эксплуатацию полнофункциональные системы должны обеспечивать работу с учетом реального фактического состояния каждого типа и конкретного образца диагностируемого оборудования.



Рис. 1. Фрагменты современных распределительных устройств высокого напряжения (РУВН): а – на базе системы «Каскад»; б – на базе КСО-314

В настоящее время в ПАО «Газпром» активно ведется модернизация систем автоматики электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) [10–12]. В частности, на КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» старые релейные и аналоговые САУ ЭГПА типа Электра 2-2 и А-705-15 заменяются на современные микропроцессорные системы типа КРУГ-2000, САУ КАРАТ-М и др. Однако эти системы в основном позволяют реализовывать управление и контроль над процессами, происходящими в механической и технологической частях ЭГПА, и практически не позволяют анализировать режимы работы и определять техническое состояние приводного высоковольтного синхронного электродвигателя типа СТД-12500-2.

Особенности физики процессов в синхронных электродвигателях. Синхронные вы-

соковольтные электродвигатели (СД) ЭГПА, применяемые на КС, достаточно сложные электрические машины (рис. 2) [13–15]. Их можно математически формализовать с различной степенью детализации характеристик (состояния их функциональных узлов; режимных параметров; теплового и вибрационного состояния; схемы внешних подключений и внутренних соединений). Каждый уровень детализации может быть описан соответствующей математической моделью прогноза технического состояния [16–18], позволяющей использовать для обработки и хранения информационных баз данных общепромышленные встроенные компьютеры. В качестве модели описания поведения исправного электродвигателя и его неисправных модификаций можно использовать формализованные модели объекта или его составляющих.



а)



б)

Рис. 2. Варианты исполнения высоковольтных приводных электродвигателей ЭГПА: а – горизонтальное исполнение; б – вертикальное исполнение

Наиболее целесообразной при выборе модели мониторинга электродвигателей ЭГПА является функциональная диагностическая модель, при использовании которой входные воздействия элементарных проверок определены заранее рабочим алгоритмом работы объекта и выбору подлежат только составы контролируемых параметров объекта диагностирования. При таком подходе средства диагностирования, как правило, являются *встроенными* в объект мониторинга [19–21], а сигналы об изменении состояния изменяются при нарушении штатной работы СД. В этом случае для контроля и диагностики электродвигателя могут быть использованы существующие и вновь разработанные датчики режимных электромагнитных и механических величин, характеризующих работу исследуемого СД, а функциональную модель исправного двигателя легко формализовать с помощью контроллера. В данном случае такую модель можно использовать и при диагностировании состояния электродвигателя, так как в результате мониторинга каждый раз определяется не более чем одна характеристика указанного процесса эволюции для текущего момента времени. При этом можно получить предысторию (динамику) развития процесса изменения состояния двигателя в прошлом и настоящем. Как правило, до наступления отказа изменяются основные параметры работы электродвигателя и алгоритмы их взаимодействия. В этом случае двигатель может быть остановлен до развития и возникновения аварии для проведения дополнительных измерений методами тестовой диагностики в соответствии с регламентами ТОиР по фактическому состоянию.

Поскольку природа физических процессов, обуславливающих проявление факторов старения статорной изоляции, является различной, то при их математической формализации используются соответствующие методы. Рассмотрим математические модели процессов старения изоляции СД в соответствии с этими эксплуатационными факторами.

Нагрев статорной обмотки электродвигателя. Для мониторинга и прогнозирования температурных режимов статорной изоляции обмоток СД целесообразно использовать одну из тепловых моделей нагрева двигателей переменного тока [22, 23]. В инженерной практике тепловых расчетов широкое распространение получило упрощенное представление СД как однородного тела с одним источником тепла. В соответствии с одноступенчатой теорией нагрева, уравнение теплового баланса СД с учетом ряда упрощающих допущений имеет следующий вид:

$$C \frac{dv}{dt} + \Lambda \cdot v = \Delta P, \quad (1)$$

где C – теплоемкость двигателя; Λ – теплоотдача статора СД; v – превышение температуры

двигателя над окружающей средой; ΔP – потери мощности.

Решение уравнения (1) для общего случая нагрева машины имеет вид

$$v = \frac{\Delta P}{\Lambda} + k \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (2)$$

где k – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий; $T = C / \Lambda$ – постоянная времени нагрева, неизменяемая в процессе нагрева.

Однако модель (2) для мощных машин, отличающихся большими габаритами и инерционностями, не отвечает требованиям адекватности математического описания для оперативного мониторинга состояния изоляции статорной обмотки.

В связи с этим более точной для прогнозного анализа температуры обмоток СД ЭГПА является трехступенчатая теория нагрева. В основу ее положена физическая картина процесса нагрева СД как системы, состоящей из трех взаимосвязанных в тепловом отношении тел (рис. 1): обмотки статора (медь пазовой и лобовой частей); самого статора (сталь сердечника и корпуса) и ротора (обмотка возбуждения, сталь сердечника, вала, подшипников). При этом сделаны общепринятые допущения: каждая составляющая представляет собой однородное тело; греющие потери являются функциями превышения температуры; теплоемкости не зависят от температуры; теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна разности температур; потери в стали постоянны.

На рис. 3 изображена модель СД, где v_1, v_2, v_3 – превышения температур обмотки статора, корпуса статора и ротора над температурой окружающей среды; C_1, C_2, C_3 – теплоемкости обмотки статора, корпуса и ротора; A_1, A_2, A_3 – коэффициенты теплоотдачи соответствующих частей СД окружающей среде; A_{31}, A_{21} – коэффициенты теплоотдачи между телами.

Тепловой баланс СД как системы трех совместно нагреваемых тел в установившемся тепловом режиме при неизменном токе нагрузки описывается системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_1}{dt} \Lambda_1 \cdot v_1 + \Lambda_{12} (v_1 - v_2) + \Lambda_{13} (v_1 - v_3) &= \Delta P_{M1}; \\ C_2 \frac{dv_2}{dt} \Lambda_2 \cdot v_2 + \Lambda_{21} (v_2 - v_1) + \Lambda_{23} (v_2 - v_3) &= \Delta P_{C1}; \\ C_3 \frac{dv_3}{dt} \Lambda_3 \cdot v_3 + \Lambda_{31} (v_3 - v_1) + \Lambda_{32} (v_3 - v_2) &= \Delta P_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Lambda_{12}, \Lambda_{21}$ – взаимные тепловые проводимости между медью и сталью через пазовую изоляцию; $\Lambda_{13}, \Lambda_{31}$ – то же между обмоткой статора и ротором через пазовую изоляцию и воздушный зазор; $\Lambda_{23}, \Lambda_{32}$ – то же между сталью статора и ротором через воздушный зазор; $\Delta P_{M1}, \Delta P_{C1}, \Delta P_2$ –

потери мощности в меди статора, стали статора и суммарные потери в роторе соответственно.

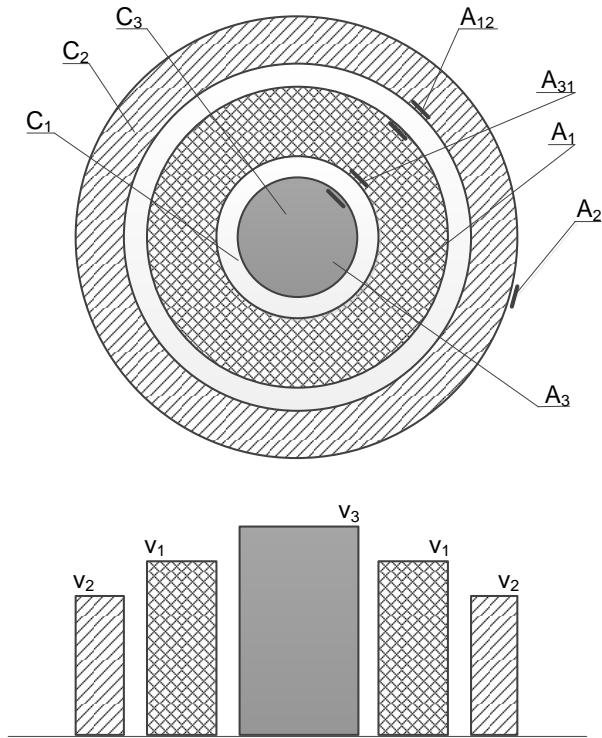


Рис. 3. Трехступенчатая тепловая модель нагрева СД

В установившемся режиме при продолжительной нагрузке по току выполняется условие

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{dv_2}{dt} = \frac{dv_3}{dt} = 0, \quad (4)$$

следовательно, система (3) после очевидных преобразований может быть представлена в более удобном виде:

$$\begin{bmatrix} a_1 & -\Lambda_{12} & -\Lambda_{13} \\ -\Lambda_{21} & a_2 & -\Lambda_{23} \\ \Lambda_{31} & -\Lambda_{32} & a_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_{M1} \\ \Delta P_{C1} \\ \Delta P_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $a_1 = \Lambda_1 + \Lambda_{12} + \Lambda_{13} - \alpha \Delta P_{M10}$;

$$a_2 = \Lambda_2 + \Lambda_{21} + \Lambda_{23};$$

$$a_3 = \Lambda_3 + \Lambda_{31} + \Lambda_{32};$$

$$\Lambda'_{31} = \alpha S I_H^2 \cdot R_1 - \Lambda_{31};$$

$$\Delta P_{M10} = I_H^2 \cdot R_1; \quad (6)$$

$$\Delta P_2 = P_H \frac{n_s^3 s}{n_H^3 (1-s)},$$

где ΔP_{M10} – потери мощности в обмотке статора в начальный момент нагрева; α – температурный коэффициент; R_1 – активное сопротивление обмотки статора.

Решая систему (5) с учетом выражений (6), находим средние значения установившихся превышений температур:

$$v_1 = \frac{\Delta P_{M10} (a_2 a_3 - \Lambda'_{23} \Lambda'_{23}) + \Delta P_{C1} (a_3 \Lambda'_{12} + \Lambda'_{32} \Lambda'_{32})}{N} + \quad (7)$$

$$+ \frac{\Delta P_2 (a_2 \Lambda'_{31} + \Lambda'_{12} \Lambda'_{23})}{N};$$

$$v_2 = \frac{\Delta P_{M10} (a_3 \Lambda'_{21} - \Lambda'_{31} \Lambda'_{32}) + \Delta P_{C1} (a_1 a_3 + \Lambda'_{13} \Lambda'_{31})}{N} + \quad (8)$$

$$+ \frac{\Delta P_2 (a_1 \Lambda'_{23} + \Lambda'_{21} \Lambda'_{13})}{N};$$

$$v_3 = \frac{\Delta P_{M10} (\Lambda'_{21} \Lambda'_{32} - a_2 \Lambda'_{31}) + \Delta P_{C1} (a_1 \Lambda'_{32} + \Lambda'_{12} \Lambda'_{31})}{N} + \quad (9)$$

$$+ \frac{\Delta P_2 (a_1 a_3 + \Lambda'_{12} \Lambda'_{21})}{N};$$

$$N = (a_2 a_3 - \Lambda'_{21} \Lambda'_{32}) - \Lambda'_{21} (a_3 \Lambda'_{12} + \Lambda'_{13} \Lambda'_{32}) - \quad (10)$$

$$- \Lambda'_{31} (a_2 \Lambda'_{13} + \Lambda'_{12} \Lambda'_{23}).$$

Экспериментальными исследованиями установлено, что величина условной расчетной теплоотдачи СД зависит от его нагрузки (статического момента на валу) в соответствии с эмпирической формулой, справедливой при изменении нагрузки от тока холостого хода до двукратного номинального:

$$\frac{\Lambda}{\Lambda_{НОМ}} = \sqrt{\frac{I_{НОМ}}{I_s}}, \quad (11)$$

где $\Lambda/\Lambda_{НОМ}$ – относительная расчетная теплоотдача; I_s и $I_{НОМ}$ – текущее и номинальное значения статорного тока СД.

Тогда средние установившиеся превышения температуры рассматриваемых частей СД можно вычислить в соответствии с (6) и (11) по следующим формулам:

$$a_1 = \Lambda_1 \sqrt{\frac{I_{НОМ}}{I_s}} + \Lambda_{12} + \Lambda_{13} - \alpha I_s^2 R_1; \quad (12)$$

$$a_2 = \Lambda_2 \sqrt{\frac{I_{НОМ}}{I_s}} + \Lambda_{21} + \Lambda_{23}; \quad (13)$$

$$a_3 = \Lambda_3 \sqrt{\frac{I_{НОМ}}{I_s}} + \Lambda_{31} + \Lambda_{32}; \quad (14)$$

$$\Lambda_{31}' = \alpha S I_s^2 R_1 - \Lambda_{31}; \quad (15)$$

$$\Delta P_{M10} = I_s^2 R_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha \Delta T^0), \quad (16)$$

где $R_{20^\circ\text{C}}$ – сопротивление обмотки статора при температуре 20 °С; ΔT^0 – разность температур в исследуемом режиме и 20 °С.

Для СТД-12500-2 исследования показали следующее:

- превышение температуры стали статора v_2 точно «отслеживает» превышение температуры обмотки статора v_1 , а превышение температу-

ры ротора λ_3 значительно отличается от предыдущих значений. Это с неизбежностью вытекает из сопоставления взаимных тепловых проводимостей, где очевидно, что $\Lambda_{12} \gg \Lambda_{23} > \Lambda_{13}$;

- максимумы превышения температур, как и максимумы относительных потерь (рис. 4), проявляются при угловой скорости вращения $\omega = 0,67\omega_0$ (синхронная скорость);

- существует диапазон скоростей, в пределах которого не наблюдается превышение номинальных значений температур частей машины;

- номинальные превышения температур обмоток статора СД, полученные при расчете по моделям (7)–(16), в основном близки к стандартной рабочей температуре, установленной ГОСТом и заводом-производителем для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости.

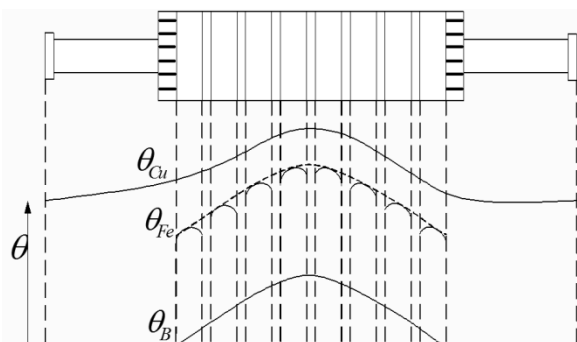


Рис. 4. Расчетные данные перегрева обмоток статора

В соответствии с рассмотренной теорией нагрева может быть определен срок службы статорной изоляции:

$$T = Ae^{-\alpha v}, \quad (17)$$

где A , α – экспериментально установленные коэффициенты для изоляции машин; v – температура изоляции, °С.

Так, например, для СД с изоляцией класса В имеем $T = 3,31 \cdot 10^4 e^{-0,0662 v}$.

Представляется целесообразным оценить влияние возможной ошибки на основной результат – предельно допустимый по нагреву диапазон скоростей СД. Однако, поскольку большинство параметров, определяющих теплоотдачи и взаимные тепловые проводимости, определяется геометрическими размерами машин, то ошибка возможна при определении скорости воздуха, обтекающего поверхности элементов электродвигателей. В связи с этим достаточно точное определение именно этой величины не представляется возможным.

Кроме того, аналитическая трехступенчатая теория нагрева не учитывает ряд параметров (способ охлаждения, оребренность внешней поверхности машины, теплоотвод через станину и подшипниковые щиты, влияние значительного объема воздуха внутри СД на

тепловое состояние статора). Уточняется тепловой расчет с помощью тепловых схем замещения СД с помощью соответствующего ПО на ПК.

Механические нагрузки, действующие на изоляцию статорных обмоток. В процессе эксплуатации на изоляцию обмотки статора в стационарных и переходных режимах действуют механические нагрузки: электродинамические, вибрационные и термомеханические.

Однако при формализации механических нагрузок, выдерживаемых изоляцией, следует прежде всего проанализировать их составляющую технологического характера, которая образуется в процессе изготовления и укладки обмоток. Практически начальные нагрузки в статорных обмотках могут быть оценены лишь приближенно вероятностными методами, поскольку они определяются культурой производства, уровнем конструкторских и технологических разработок. Так, например, можно оценить нагрузки, создаваемые гидравлическими прессами (величина среднего давления до 50 кг/см^2), но невозможно с достаточной точностью определить ударные нагрузки, создаваемые молотком при рихтовке на шаблоне.

Во всех случаях с увеличением размеров обмоток увеличиваются и начальные давления, возникающие при их деформациях и «подгонках», приводя к частичному разрушению и снижению прочности изоляции. С полной достоверностью можно утверждать, что особенно опасными являются деформации стержневых обмоток большого сечения, поскольку относительно удлинение при изгибе растет пропорционально линейным размерам сечения обмотки.

Технологические нагрузки на изоляцию от корпуса статора определяются весом обмотки, а также условиями ее хранения. Учитывая, что масса стержней обмоток современных СД ЭГПА достигает 250 кг и при хранении они могут укладываться в 2–3 ряда, нагрузки на изоляцию в месте соприкосновения с прокладками достигают сотен кг. При неудачном выполнении прокладок эти нагрузки распределяются неравномерно, приводя к появлению начальных удельных давлений до 100 кг/см^2 .

При эксплуатации в установившихся режимах работы витковая и корпусная изоляция обмоток подвергается действию относительно незначительных электродинамических усилий. Удельное усилие на единицу длины стержня, находящегося в пазу, может быть определено по эмпирическому выражению

$$P_1 = 6,4 \cdot 10^{-8} \frac{l^2}{b_n}, \text{ кг/см}^2, \quad (18)$$

где P – усилие на 1 см длины проводника, кг; b_n – ширина паза, см; l – мгновенное значение силы тока в стержне, А.

Если обмотка статора двухслойная, то при одинаковом направлении тока в стержнях удельное усилие на 1 см длины верхнего проводника составит утроенное значение (18), т.е.

$$P_2 = 19,2 \cdot 10^{-8} \frac{I^2}{b_n}, \text{ кГ/см}^2. \quad (19)$$

Суммарное удельное усилие, действующее на изоляцию нижнего стержня, в этом случае определится суммой (18) и (19) и составит

$$P = 25,6 \cdot 10^{-8} \frac{I^2}{b_n}, \text{ кГ/см}^2. \quad (20)$$

Для численной оценки (20) необходимо учесть следующее:

- линейная нагрузка AS на стержень связана с рабочим током стержня, A , при двухслойной обмотке линейной зависимостью

$$I = \frac{AS \cdot t_n}{2}, \quad (21)$$

где t_n – пазовое деление, см;

- отношение α_n ширины паза b_n к пазовому делению колеблется для большинства синхронных машин большой мощности в диапазоне 0,35–0,05;

- соотношение ширины меди к ширине паза для высоковольтных машин, в соответствии со статистикой обмоточных данных, составляет 0,6.

Тогда получим зависимость максимального амплитудного давления на 1 см² поверхности изоляции на дне паза от линейной нагрузки:

$$P = \frac{P}{0,6 \cdot b_n} = (173...85) \cdot 10^{-8} AS^2, \text{ кГ/см}^2. \quad (22)$$

На рис. 5 представлена зависимость удельных максимальных амплитудных значений давлений на дно пазов СД с двухслойными обмотками в функции линейной нагрузки.

Пределные значения удельных амплитудных электродинамических давлений не превышают 1 кГ/см² для синхронных машин, в которых линейная нагрузка не превосходит 500 А/см, и для ЭГПА с поверхностным охлаждением обмоток, в которых линейная нагрузка находится в пределах до 700 А/см. Для синхронных машин, в которых линейные нагрузки достигают значений 2000 А/см, эти давления составляют 7 кГ/см², что в десятки раз превышает удельный вес стержня, и могут вызывать вибрацию стержня и разрушение его изоляции.

Во вновь проектируемых СД эти давления могут достигать и еще больших значений, что, естественно, требует выполнения изоляции с соответствующими механическими характеристиками в холодном и нагретом состояниях. Значения этих усилий для двигателей, применяемых в ЭГПА, достигают 650 кГ/см². Действуя с частотой 100 Гц в пазах, где направления токов совпадают, усилия будут вызывать опрессовку стержня, если он не был уложен с

необходимой плотностью. Внешне такое самопрессование стержней в пазу может выражаться в ослаблении клиньев.

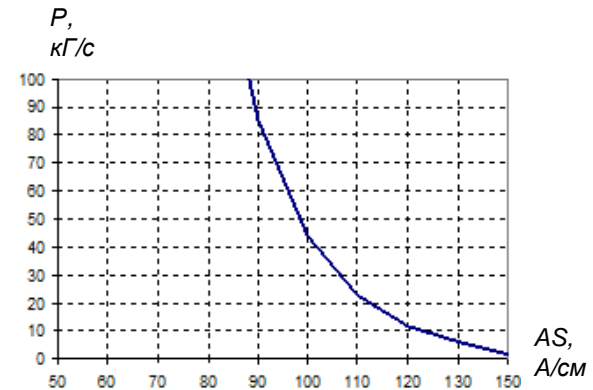


Рис. 5. Зависимость амплитудного значения давления на изоляцию статорной обмотки в пазовой части в функции линейной нагрузки (AS)

Значительно более высоких значений достигают усилия, действующие на обмотку в переходных режимах и, в частности, при внезапном КЗ, которое обмотка обязана выдержать без разрушения, или при реакторном пуске двигателя. С учетом проведенных замеров пусковых токов двигателя СТД-12,5 это значение усилия на изоляцию у дна паза составляет 25 кГ/см².

Наряду с усилиями, действующими на стержни обмотки в радиальном направлении и вызывающими их опрессовку, в пазовой части действуют также тангенциальные пульсирующие усилия, прижимающие стержни к стенке паза, величина которых определяется как

$$F = 1,02 \cdot H \cdot J \cdot 10^{-7}, \text{ кГ/см}^2, \quad (23)$$

где F – усилие на 1 см длины стержня, кГ; H – радиальная магнитная индукция в пазу, Гс; J – амплитудное значение силы тока в стержне, А.

Величина этого усилия, рассчитанная для ряда СД, колеблется в достаточно широких пределах, в зависимости от силы тока в стержне, марки стали сердечника статора и конструкции обмотки. Для приводных электродвигателей ЭГПА мощностью до 100 МВт с током в стержне до 10 кА величина радиального удельного усилия на 1 м длины стержня не превышает 1,5 кГ.

Сравнивая тангенциальные усилия (23) с радиальными (22), можно установить, что они на порядок меньше последних. Однако следует иметь в виду, что и жесткость стержней в тангенциальном направлении меньше, чем в радиальном, и деформация их изгиба при прочих равных условиях закрепления будет в обоих направлениях практически одинаковой.

Выводы. Результаты математического моделирования термодинамических процессов в электродвигателях мегаваттного класса на основе трехступенчатой теории нагрева позволяют адекватно оценить техническое состояние

машин переменного тока. Дополнительные уточнения, связанные с учетом способа охлаждения, ребренности внешней поверхности машины, теплоотвода через станину и подшипниковые щиты, влияния значительного объема воздуха внутри, производятся с помощью тепловых схем замещения синхронных двигателей.

Расчетное определение электродинамических усилий, как правило, производится с учетом некоторых упрощающих допущений, однако точность в этом случае достаточна для практической оценки сил, действующих на изоляцию мощных машин. Можно рекомендовать определять лишь некоторые основные составляющие, к числу которых относятся усилия, вызываемые взаимодействием токов одной фазы и действующие на крайний стержень фазовой группы в эвольвентной части стержня.

Список литературы

1. **Энергосбережение** и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А.Ф. Пужайло, Е.А. Спиридович, В.И. Воронков и др. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 570 с.
2. **Babichev S.A., Zakharov P.A.** Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units // *Automation and Remote Control*. – 2011. – Vol. 72, No. 6. – P. 175–180.
3. **Milov V.R., Suslov B.A.** Intellectual management decision support in gas industry // *Automation and Remote Control*. – 2011. – Vol. 72, No. 5. – P. 1095–1101.
4. **Kadin S.N., Kazachenko A.P., Kryukov O.V.** Questions related to the development of metrological assurance in the design of Gazprom facilities // *Measurement Techniques*. – 2011. – Vol. 54, No. 8. – P. 944–952.
5. **Babichev S.A., Titov V.G.** Automated safety system for electric driving gas pumping units // *Russian Electrical Engineering*. – 2010. – Vol. 81, No. 12. – P. 649–655.
6. **Babichev S.A., Vyckov E.V.** Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units // *Russian Electrical Engineering*. – 2010. – Vol. 81. – P. 489–494.
7. **ГОСТ 32106-2013** Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. – М.: Стандартинформ, 2013. – 9 с.
8. **СТО Газпром 2-2.3-624-2011** Порядок проведения технического обслуживания, диагностирования и ремонта. – М.: ООО «Газпром Экспо», 2012. – 97 с.
9. **СТО Газпром 18000.3-011-2020** Единая система управления производственной безопасностью. – СПб.: ООО «Газпром Экспо», 2022. – 66 с.
10. **Крюков О.В., Степанов С.Е.** Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих КС // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Междунар. науч.-техн. конф.: сб. ст. / под ред. М.А. Щербакова. – Пенза, 2013. – С. 29–32.
11. **Степанов С.Е., Бычков Е.В.** Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов // Труды АЭП-2014 / отв. И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – С. 409–414.
12. **Крюков О.В., Титов В.Г.** Анализ пусковых режимов электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 3. – С. 29–35.
13. **Васенин А.Б., Степанов С.Е.** Автоматизированный электропривод подводных компрессорных станций // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XXII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2023. – С. 75–78.
14. **Крюков О.В.** Комплексный анализ условий эксплуатации электродвигателей ГПА // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 4. – С. 14–19.
15. **Kiyanov N.V., Pribytkov D.N., Gorbatshkov A.V.** A Concept for the development of invariant automated electric drives for the water recycling systems with fan cooling towers // *Russian Electrical Engineering*. – 2007. – Vol. 78, No. 11. – P. 621–627.
16. **Serebryakov A.V.** Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors // Вестник ЮУрГУ. Энергетика. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 66–74.
17. **Серебряков А.В.** Универсальная система мониторинга электродвигателей ГПА // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 4(546). – С. 74–81.
18. **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. 516–520.
19. **Захаров П.А., Крюков О.В., Киянов Н.В.** Встроенная система диагностирования и прогнозирования ЭГПА // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 11. – С. 43–49.
20. **Степанов С.Е., Титов В.Г.** Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – № 2. – С. 5–10.
21. **Васенин А.Б., Степанов С.Е.** Система интеллектуального мониторинга состояния магистрального газопровода «Сахалин–Хабаровск–Владивосток» // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. – 2019. – № 2(36). – С. 40–53.
22. **Крюков О.В.** Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга: дис. ... д-ра техн. наук. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2015.
23. **Серебряков А.В.** Методы синтеза встроенных систем прогнозирования технического состояния высоковольтных двигателей // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2015. – С. 69–73.

References

1. Puzhaylo, A.F., Spiridovich, E.A., Voronkov, V.I. *Energoberezhenie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy saving and automation of electrical equipment at compressor stations]. N.Novgorod: Vektor TiS, 2010. 570 p.
2. Babichev, S.A., Zakharov, P.A. Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 6, pp. 175–180.
3. Milov, V.R., Suslov, B.A. Intellectual management decision support in gas industry. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 5, pp. 1095–1101.

4. Kadin, S.N., Kazachenko, A.P., Kryukov, O.V. Questions related to the development of metrological assurance in the design of Gazprom facilities. *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, no. 8, pp. 944–952.
5. Babichev, S.A., Titov, V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, no. 12, pp. 649–655.
6. Babichev, S.A., Bychkov, E.V. Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, pp. 489–494.
7. GOST 32106-2013 *Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Monitoring sostoyaniya oborudovaniya opasnykh proizvodstv* [Machine condition monitoring and diagnostics. Monitoring the condition of hazardous production equipment]. Moscow: Standartinform, 2013. 9 p.
8. STO Gazprom 2-2.3-624-2011 *Poryadok provedeniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya, diagnostirovaniya i remonta* [Procedure to carry out technical maintenance, diagnostics and repairs]. Moscow: OOO «Gazprom Ekspo», 2012. 97 p.
9. STO Gazprom 18000.3-011-2020 *Edinaya sistema upravleniya proizvodstvennoy bezopasnost'yu* [Unified industrial safety management system]. Saint-Petersburg: OOO «Gazprom Ekspo», 2022. 66 p.
10. Kryukov, O.V., Stepanov, S.E. Modernizatsiya sistem upravleniya EGPA v usloviyakh deystvuyushchikh KS [Modernization of EGPA control systems under conditions of existing compressor stations]. *Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh"* [Proceedings of research papers of international scientific and technical conference "Problems of automation and control in technical systems"]. Penza, 2013, pp. 29–32.
11. Stepanov, S.E., Bychkov, E.V. Invariantnye sistemy tekhnologicheskii svyazannykh elektroprivodov ob"ektov magistral'nykh gazoprovodov [Invariant systems of technologically connected electric drives of main gas pipeline facilities]. *Trudy AEP-2014*, 2014, pp. 409–414.
12. Kryukov, O.V., Titov, V.G. Analiz puskovykh rezhimov elektroprivodnykh gazoperekachivayushchikh agregatov [Analysis of starting operation modes of electric-driven gas-pumping units]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2012, no. 3, pp. 29–35.
13. Vasenin, A.B., Stepanov, S.E. Avtomatizirovanny elektroprivod podvodnykh kompressornykh stantsiy [Automated electric drive for underwater compressor stations]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii" (XXII Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of international scientific and technical conference "Current state and trends of the development of electrical and thermal technologies" (XXII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2023, pp. 75–78.
14. Kryukov, O.V. Kompleksnyy analiz usloviy ekspluatatsii elektrodvigately GPA [Comprehensive analysis of operating conditions of GPA electric motors]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2013, no. 4, pp. 14–19.
15. Kiyarov, N.V., Pribytkov, D.N., Gorbatushkov, A.V. A Concept for the development of invariant automated electric drives for the water recycling systems with fan cooling towers. *Russian Electrical Engineering*, 2007, vol. 78, no. 11, pp. 621–627.
16. Serebryakov, A.V. Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors. *Vestnik YUUrGU. Energetika*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 66–74.
17. Serebryakov, A.V. Universal'naya sistema monitoringa elektrodvigately GPA [Universal monitoring system for GPA electric motors]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2016, no. 4(546), pp. 74–81.
18. 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. 516–520.
19. Zakharov, P.A., Kryukov, O.V., Kiyarov, N.V. Vstroennaya sistema diagnostirovaniya i prognozirovaniya EGPA [Built-in diagnostic and forecasting system of EGPA]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2008, no. 11, pp. 43–49.
20. Stepanov, S.E., Titov, V.G. Vstroennyye sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya elektroprivodov dlya energeticheskoy bezopasnosti transporta gaza [Built-in systems for monitoring the technical condition of electric drives for energy security of gas transportation]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, 2012, no. 2, pp. 5–10.
21. Vasenin, A.B., Stepanov, S.E. Sistema intellektual'nogo monitoringa sostoyaniya magistral'nogo gazoprovoda «Sakhalin–Khabarovsk–Vladivostok» [Intelligent monitoring system for the Sakhalin–Khabarovsk–Vladivostok gas pipeline]. *Avtomatizatsiya IT v neftegazovoy oblasti*, 2019, no. 2(36), pp. 40–53.
22. Kryukov, O.V. *Energoeffektivnye elektroprivody GPA na baze intellektual'nykh sistem upravleniya i monitoringa*. Diss. ... d-ra tekhn. nauk [Energy-efficient electric drives of gas pumping units based on intelligent control and monitoring systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow: AO «Korporatsiya VNIIEM», 2015.
23. Serebryakov, A.V. Metody sinteza vstroennykh sistem prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnykh dvigateley [Methods for synthesis of embedded systems to predict the technical condition of high-voltage motors]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XVIII Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of international scientific and technical conference "Current state and trends of the development of electrical and thermal technologies" (XVIII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2015, pp. 69–73.