

Комплексный анализ условий эксплуатации изоляции обмоток статоров электродвигателей газоперекачивающих агрегатов

Бабичев С.А., инж.

Приведен анализ статистических данных повреждаемости изоляции статоров и условий эксплуатации высоковольтных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов. Выявлены наиболее характерные условия возникновения пробоя изоляции и места повреждений. Приведен теоретический анализ и практические результаты количественной оценки наиболее существенных эксплуатационных факторов, влияющих на ресурс изоляции. Предложены варианты повышения надежности и эффективности работы электроприводных газоперекачивающих агрегатов.

Ключевые слова: электроприводной газоперекачивающий агрегат, синхронный электродвигатель, изоляция обмотки, температура обмотки, частичные разряды, перенапряжения.

The complex analysis of conditions of operation of isolation of windings stators electric motors Gas-Transfer Units.

Babichev S.A.

The analysis of statistical data of damageability of isolation stator and conditions of operation of high-voltage electric motors Gas-Transfer Units is resulted. The most typical conditions of occurrence of breakdown of isolation and a place of damages are revealed. The theoretical analysis and practical results of a quantitative estimation of the most essential operational factors influencing on a resource of isolation is resulted. Variants of increase of reliability and an overall performance electric drive Gas-Transfer Units are offered.

Keywords: electric drive Gas-Transfer Units, the synchronous electric motor, isolation of a winding, temperature of a winding, partial discharge, an overstrain.

Транспорт газа по Единой системе газоснабжения России, осуществляется с применением газоперекачивающих агрегатов (ГПА) разных типов и единичной мощности. Значительную часть ГПА ОАО «Газпром» (725 шт.), участвующих в транспорте газа, составляют электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА).

Типовая схема электроснабжения электроприводного компрессорного цеха (КЦ) приведена на рис. 1.

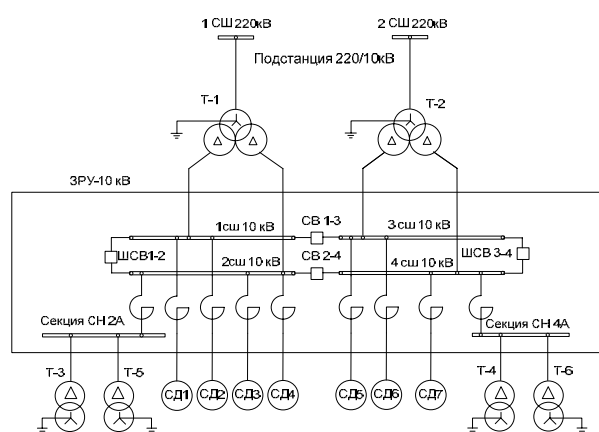


Рис. 1. Схема электроснабжения электроприводного КЦ: Т-1, Т-2 – трансформаторы типа ТРДЦН-63000/220; ЭД1-ЭД7 – электродвигатели ЭГПА типа СТД 12500-2; ШСВ1-2, ШСВ3-4 – шинно-выключательные аппараты; СВ1-3, СВ2-4 – секционные выключатели; Т-3, Т-4, Т-5, Т-6 – трансформаторы 10/0,4 кВ (400–1600 кВа) питания собственных нужд КС

Электроснабжение компрессорного цеха осуществляется от двух трансформаторов 220/10 кВ с расщепленными обмотками. Электрооборудование 10 кВ размещено в закрытом распределительном устройстве (ЗРУ-10 кВ). В связи с невозможностью по технологическим причинам осуществлять самозапуск ЭГПА АВР выведен из работы. Схема отличается от стандартных схем распределительных устройств наличием шинно-выключательных аппаратов ШСВ, необходимых для уменьшения времени запуска ЭГПА и снижения при пуске глубины просадки напряжения на секциях шин 10 кВ.

Структурная схема ЭГПА-12,5 приведена на рис. 2. Основными элементами ЭГПА являются центробежный нагнетатель типа Н-235-21-3, повышающий редуктор, синхронный электродвигатель с тиристорной щеточной системой возбуждения, системами масла, смазки (низкого давления) и уплотнения (высокого давления), системой автоматического управления и защиты.

Обладая более простой конструкцией, ЭГПА имеют более высокие показатели надежности, чем газотурбинные ГПА. Однако необходимо учитывать, что вынужденный или аварийный останов любого ГПА ведет не только к большим затратам на ремонтно-восстановительные работы, но и к снижению производительности газопровода в целом при отсутствии необходимых резервов на компрессорных станциях (КС), потерям пускового и то-

пливного газа, электроэнергии, горючесмазочных материалов и др.

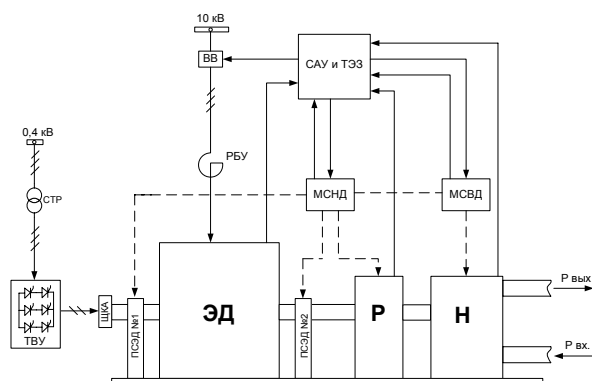


Рис. 2. Структурная схема ЭГПА-12,5: ЭД – приводной электродвигатель типа СТД-12500-2Р (10 кВ); ПСЭД – подшипники скольжения СД; Р – повышающий редуктор; Н – центробежный нагнетатель; ТВУ – тиристорное возбужденное устройство; ЩКА – щеточно-контактный аппарат системы возбуждения; СТР – согласующий трансформатор; РБУ – токоограничивающий реактор; ВВ – высоковольтный выключатель; САУ и ТЭЗ – система автоматического управления, технологических и электрических защит ЭГПА; МСНД – маслосистема низкого давления

Наиболее тяжелым отказом ЭГПА является выход из строя статора синхронного электродвигателя (СД). Выходы из строя в большинстве случаев возникают вследствие пробоя корпусной и пазовой изоляции. В связи с этим разработка новых методов неразрушающего контроля, диагностики и прогнозирования эксплуатационной надежности высоковольтных электродвигателей ЭГПА с учетом электрических и механических свойств изоляции и изменения этих свойств под воздействием эксплуатационных факторов представляет большой практический интерес.

Для выявления наиболее существенных эксплуатационных факторов, влияющих на надежность электродвигателей, был выполнен комплексный анализ условий эксплуатации ЭГПА, включающий в себя:

- 1) сбор и обработку достоверной информации о повреждаемости электродвигателей;
- 2) анализ режимов работы электродвигателей в номинальных режимах работы;
- 3) анализ режимов работы электродвигателей при режимных возмущениях питающей сети.

Статистические данные о повреждаемости электродвигателей. Анализ повреждаемости приводных высоковольтных электродвигателей СТД-12500-2 (10 кВ) на КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» выполнен за период с 1985 г. по 2007 г. [1]. Всего за указанный период эксплуатации зафиксировано 62 случая выхода из строя приводных электродвигателей. Средняя аварийность электродвигателей из-за повреждений обмоток статора составляет 2,7 шт/год.

В табл. 1, 2 приведены данные о распределении повреждений в зависимости от условий эксплуатации и характерные места возникновения повреждений обмоток СД.

Таблица 1

Условия возникновения повреждения статора СД	Количество повреждений
При рабочем напряжении питания	52 %
При перенапряжениях от однофазных замыканий в питающей сети	15 %
При пуске	15 %
Механические и термические повреждения	10 %
При проведении высоковольтных испытаний	8 %

Таблица 2

Место повреждения статора СД	Количество повреждений
В пазовой части обмотки	86 %
В лобовой части обмотки	11 %
На выводах	3 %

Анализ данных показывает, что в 52 % случаев повреждения произошли при установленном режиме работы СД. 86 % случаев всех повреждений произошло в пазовой части обмотки.

В условиях реальной эксплуатации сложно точно определить номер паза статора и стержень обмотки, в котором произошел пробой изоляции. Всего удалось точно определить место повреждения на 10 СД. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

№ паза статора	Фаза	Фазное рабочее напряжение стержня, В		Количество выявленных случаев пробоя изоляции
		Верхний	Нижний	
5	A	4500		3
	C		6000	
6	A	4125		1
	C		5625	
17	B	6000		2
	B		1875	
28	A	1500		1
	A		3375	
40	C	3375		3
	B		4875	

Сопоставление выявленных мест повреждения изоляции и схемы обмотки электродвигателя СТД-12500-2 показало, что 60 % повреждений в пазовой части произошло в первых витках обмотки при наибольшем рабочем напряжении стержней. Как правило, развитие аварии начинается со срабатывания защиты от замыкания на землю с последующим междуфазным замыканием, что свидетельствует о повреждениях корпусной изоляции. Основная часть повреждений приходится на середину пазовой части обмотки, менее подверженную

механическим нагрузкам. В этой части обмотки наибольшее влияние на скорость старения изоляции оказывают температура и электрические поля. 40 % повреждений в пазовой части произошло при наработке 50–60 тыс. ч.

Анализ тепловых режимов. Электродвигатель типа СТД-12500-2 имеет разомкнутый цикл воздушного охлаждения, изоляцию статора типа «Монолит-2», класс нагревостойкости В.

В соответствии с [2], наиболее существенно на срок службы изоляции влияет рабочая температура обмоток. Результаты измерения температуры меди (температура обмотки статора по одной точке в каждой фазе), стали (температура сердечника статора по одной точке в каждой фазе) и охлаждающего воздуха ЭГПА в одном из компрессорных цехов приведены на рис. 3. Все замеры выполнены с интервалом 2 ч. в течение суток (28.08.07 г.) по показаниям штатных систем контроля температуры ЭГПА на КС «Починковская». Основные среднесуточные параметры агрегатов приведены в табл. 4.

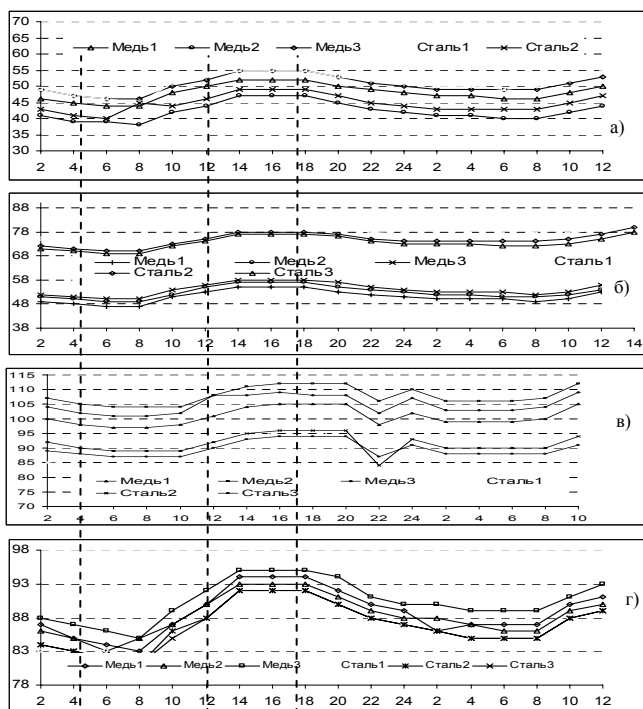


Рис. 3. Суточные изменения температуры статоров ЭГПА-12,5 КС «Починковская»: а – ЭГПА 4 КЦ Елец-2; б – ЭГПА 3 КЦ Елец-2; в – ЭГПА 1 КЦ Елец-1; г – ЭГПА 6 КЦ Елец-2

На агрегатах, работающих при одинаковой нагрузке и температуре охлаждающего воздуха, наблюдаются значительные отличия в температурных режимах. Большинство агрегатов работают при средней температуре меди и стали не более 70–80 °С. В то же время на отдельных ЭГПА наблюдается увеличение температуры обмоток и сердечника СД до 100–120 °С. При останове ЭГПА происходит «тепловой удар» и температура обмоток по-

вышается еще на 10–15 °С. На некоторых ЭГПА градиент температуры между медью и сталью более 20 °С. Причинами таких температурных отклонений могут быть неисправности в системе охлаждения СД либо снижение эффективности ее работы, дефекты сердечника статора, перевозбуждение синхронного электродвигателя, повышение напряжения питания выше 105 % и т.д.

Таблица 4

Агрегаты	Основные среднесуточные параметры работы агрегатов				Ток статора $I_{ст}$, А
	Температура, °С				
	меди t_m	стали t_c	горячего воздуха $t_{гв}$	медь–стали Δt_m	
ЭГПА 4 КЦ Елец-2	46,9	51,0	62,0	4,1	642
ЭГПА 3 КЦ Елец-2	52,9	75,3	65,0	22,4	621
ЭГПА 1 КЦ Елец-1	104,4	75,3	79,0	29,1	650
ЭГПА 6 КЦ Елец-2	89,2	87,0	76,0	2,2	618

Для определения максимальных отклонений в температуре статора при изменении режимов работы ЭГПА были выполнены измерения температуры при пуске и останове, а также изменении потребляемой мощности при перестроении режима работы газопровода. Измерения выполнены с интервалом 2 ч в течение 6 суток на КС «Починковская» и КС «Сеченовская». Анализ результатов измерений показал, что изменение температуры статора в летнее время связано с суточными колебаниями температуры охлаждающего воздуха. Зимой перепады суточной температуры наружного воздуха не оказывают влияния на изменение температуры двигателя, в этом случае температура в основном зависит от количества ЭГПА, одновременно находящихся в работе в компрессорном цехе. При останове ЭГПА за короткий промежуток времени увеличивается температура обмоток на 10–15 °С по отношению к температуре, предшествующей отключению двигателя, и может превышать максимально допустимые значения для данного класса изоляции.

В соответствии с [3], номинальная мощность СТД 12500-2 определена при номинальных значениях параметров, обуславливающих работу электродвигателя. При отклонении параметров от номинальных изменяются и допустимые режимы работы электродвигателя. В табл. 5 приведены соотношения допустимых параметров электродвигателя при изменении напряжения питания.

Таблица 5

U питания, %	110	105	100	95
$S_{двигателя}$, %	90	100	100	100
I статора, %	82	95,5	100	105
$\cos \varphi$	0,985	0,945	0,900	0,870

Кроме напряжения питания, на допустимые режимы работы существенное влияние оказывает температура охлаждающего воздуха. В табл. 6 приведена зависимость максимальной мощности от температуры входящего в электродвигатель охлаждающего воздуха.

Таблица 6

$t_{\text{входящего воздуха}}, ^\circ\text{C}$	50	45	40	30
$S_{\text{max}}, \% \text{ от номинальной}$	87	95	100	106

В соответствии с приведенными значениями допустимых параметров был проведен анализ режимов работы ЭГПА. В результате установлено, что во многих случаях электродвигатели работают с превышением допустимых значений полной мощности. На рис. 4 приведен график изменения температуры обмоток ЭГПА 2 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС «Сеченовская», получившего пробой изоляции статора. На графике хорошо заметна тенденция роста температуры электродвигателя. В течение последних 15 суток работы ЭГПА температура сердечника статора в зимнее время увеличилась на 21°C . В соответствии с зафиксированными перед аварийным остановом ЭГПА в суточной ведомости значениями параметров, электродвигатель работал с полной мощностью 12,9 МВа при напряжении питания 10,9 кВ, температуре входящего воздуха 73°C . В соответствии с табл. 4, 5, полная мощность электродвигателя при таких условиях не должна превышать 11,1 МВа.

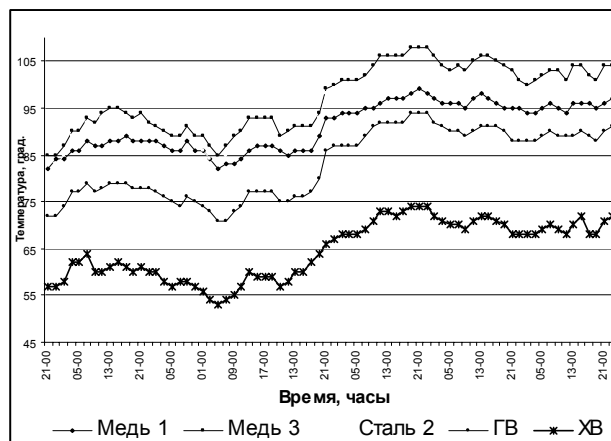
Воздействие электрических полей. На изоляцию любого электрооборудования, находящегося в эксплуатации, воздействуют длительное рабочее напряжение, кратковременные грозовые перенапряжения микросекундной длительности и внутреннее перенапряжение миллисекундного, секундного и даже минутного диапазона. Исходя из этого, был проведен анализ изменения напряжения на электродвигателях в широком диапазоне.

В связи с отсутствием за весь период наблюдений статистических данных о повреждаемости электродвигателей при прохождении грозовых фронтов, этот вид воздействия перенапряжений на обмотку не рассматривался.

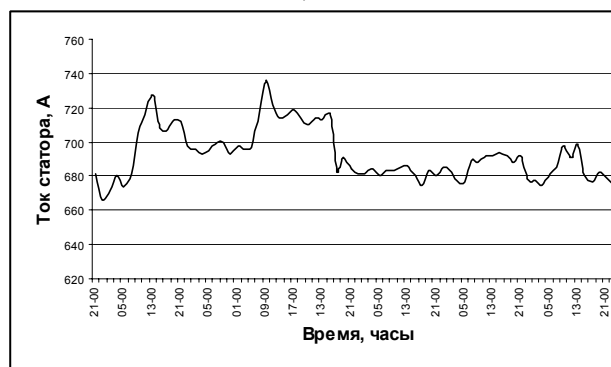
На рис. 5 приведены результаты измерения линейных напряжений на секции шин закрытого распределительного устройства 10 кВ (ЗРУ-10 кВ) с интервалом 1 ч в течение 82 ч.

В связи с отсутствием на компрессорных станциях устройств регулирования напряжения 10 кВ, линейное напряжение на электродвигателях может колебаться в зависимости от режима работы как самих электродвигателей, так и питающей их сети. Основную составляющую изменений напряжения вносит энергосистема. В ночные часы происходит увеличение напряжения на шинах ЗРУ-10 кВ, в дневные – сни-

жение. Поскольку СД являются регулируемым источником реактивной мощности, они также оказывают влияние на уровень напряжения секций шин 10 кВ. В результате проведенных на КС опытов установлено, что при изменении cosφ в диапазоне от 1 до 0,95 (емкостный) напряжение на секции шин с одним работающим ЭГПА, при дневном минимуме, увеличивается на 150–200 В.



а)



б)

Рис. 4. Суточные изменения температуры (а) и тока статора (б) ЭГПА-12,5 №2 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС «Сеченовская» перед аварийным остановом из-за пробоя изоляции статора

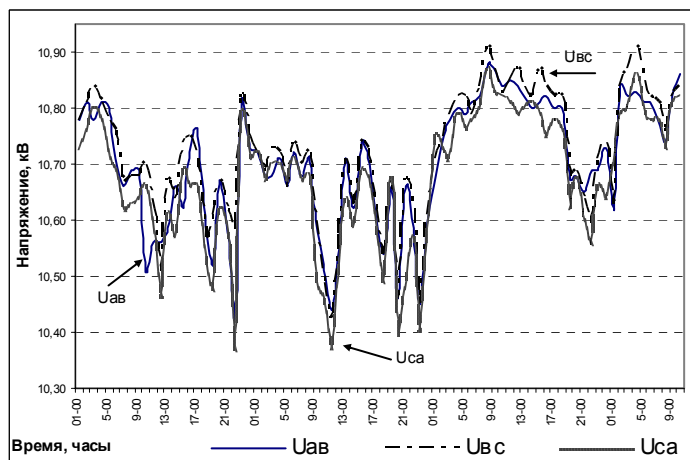


Рис. 5. График изменения линейных напряжений на шинах ЗРУ-10 кВ КЦ «Ямбург-Елец-1» КС «Починковская» при одном работающем ЭГПА

Напряжение питания электродвигателя при проведении измерений (рис. 5) изменялось от 10,37 кВ до 10,91 кВ. В интервале наблюдения напряжение удовлетворяет требованиям Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей [5], однако, как уже отмечалось выше, при этих значениях напряжения питающей сети необходимо контролировать полную мощность электродвигателя и температуру обмоток статора. Повышение напряжения питания сверх 110 % от номинального недопустимо. Иначе, вследствие насыщения стали, даже незначительный подъем напряжения выше допустимого приводит к возрастанию магнитной индукции, резкому (в несколько раз) увеличению потоков рассеяния и появлению в ребрах корпуса СД и в других конструктивных элементах очень больших паразитных токов, вызывающих дополнительный нагрев. При снижении напряжения ниже 10 кВ увеличивается ток статора и возрастает нагрев обмоток.

Частичные разряды в изоляции. Одним из существенных факторов ускоренного разрушения изоляции под воздействием электрических полей является возникновение частичных разрядов (ЧР) во внутренних полостях и по поверхности изоляции. В соответствии с [4] был проведен контроль изоляции обмотки статоров более 80 ЭГПА с использованием метода измерения частичных разрядов при подаче переменного напряжения от постороннего источника. Метод позволяет выявлять наличие скрытых дефектов во внутренних полостях изоляции, критические разряды в пазовой части изоляции, скользящие разряды в лобовых частях обмотки. По результатам диагностики установлено, что практически все электродвигатели имеют наличие ЧР различной интенсивности и амплитуды. На некоторых ЭГПА наблюдаются следы активности ЧР в лобовых частях обмотки в виде налета белого порошка соединений азота.

На рис. 6,а приведена амплитудно-фазовая диаграмма распределения ЧР фазы А обмотки статора ЭГПА 3 КЦ «Ямбург-Елец-1» КС «Починковская». На диаграмме зафиксировано большое количество частичных разрядов низкой амплитуды в диапазоне от 0° до 360°, что свидетельствует о сильном загрязнении лобовых частей обмотки масляно-графитовой смесью.

На рис. 6,б приведена диаграмма ЧР фазы С ЭГПА 7 КЦ «Ямбург-Елец-1» КС «Починковская», на которой видно большое количество ЧР, возникающих при достижении максимума амплитуды испытательного напряжения, подаваемого на обмотку. ЧР имеют большую амплитуду (до 3000 пКл) и интенсивность 36,2 PDI (пКл*В/с). В этом случае обмотка имеет дефекты в пазовой части изоляции и возможен ее пробой. На рис. 6,в приведен пример диаграммы ЧР фазы В ЭГПА 2 КЦ «Ямбург-

Елец-2» КС «Починковская» при отсутствии признаков значительных дефектов изоляции. Все диаграммы получены при измерении прибором контроля частичных разрядов в изоляции типа R-400.

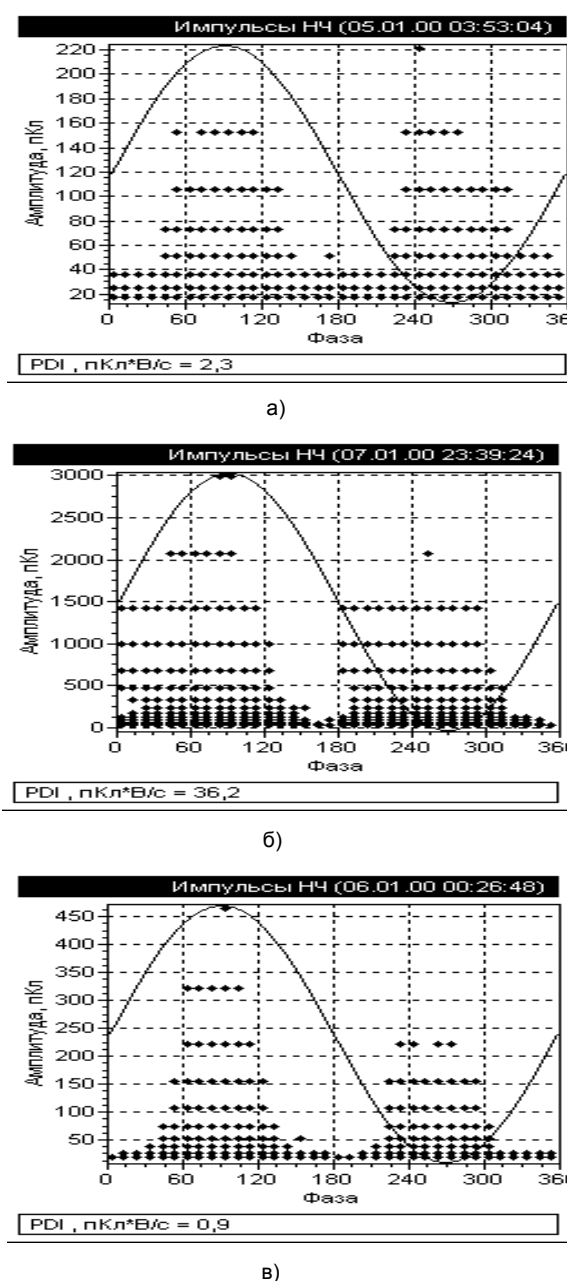
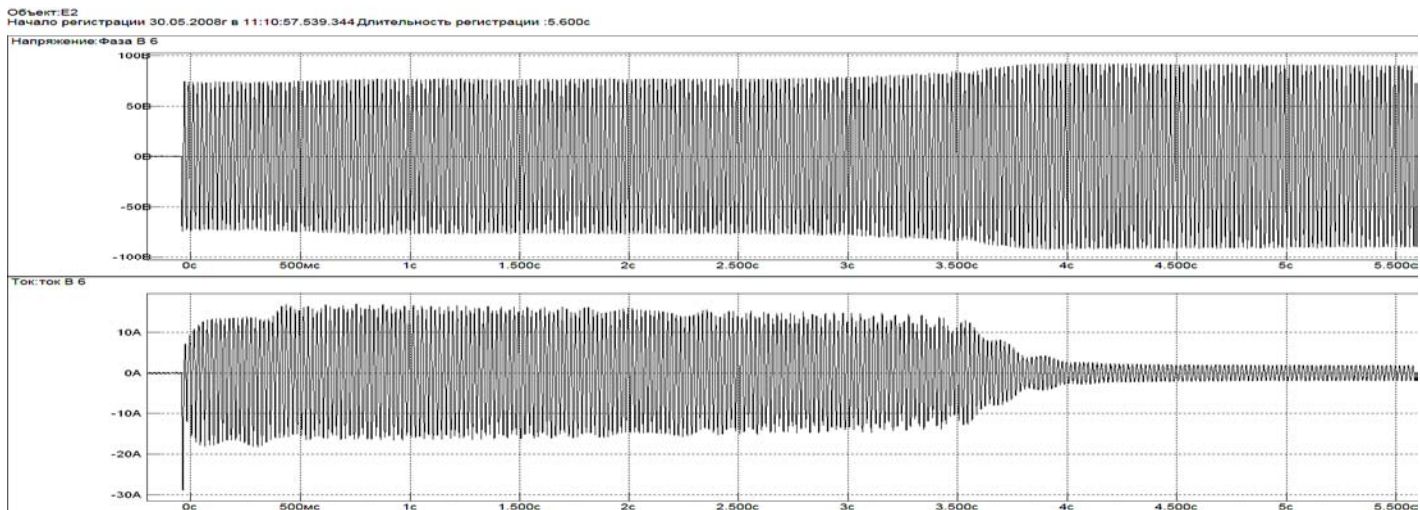
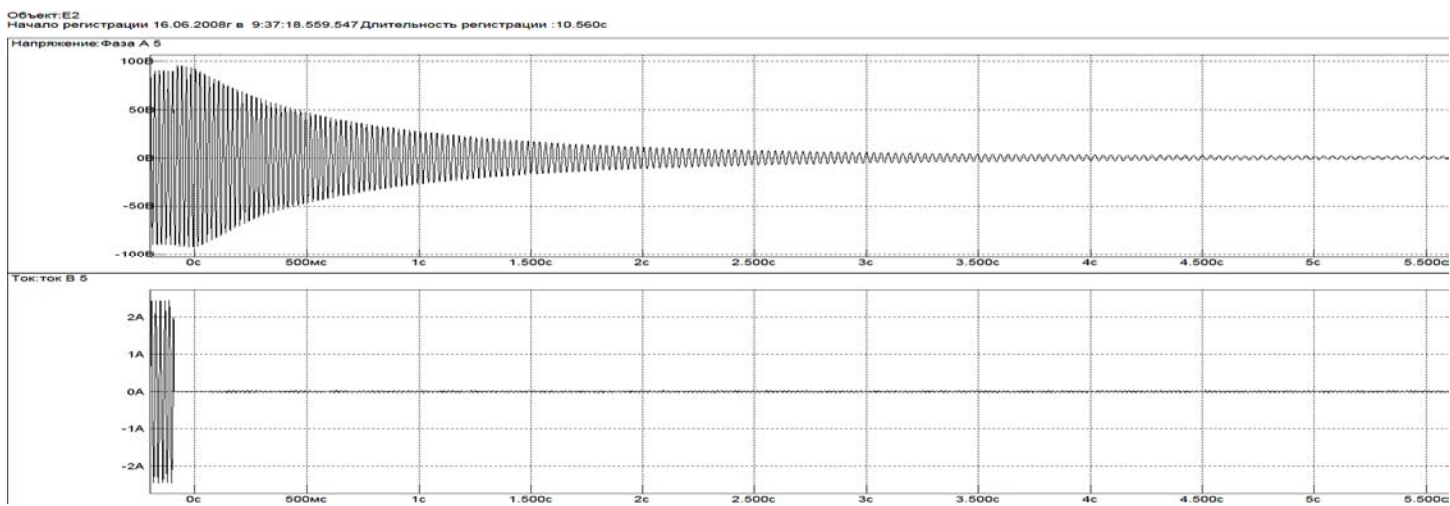


Рис. 6. Диаграммы фазового распределения ЧР: а – фаза А обмотки статора ЭГПА 3 КЦ «Ямбург-Елец-1» КС «Починковская»; б – фаза С обмотки статора ЭГПА 7 КЦ «Ямбург-Елец-1» КС Починковская; в – фаза В обмотки статора ЭГПА 2 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС «Починковская»

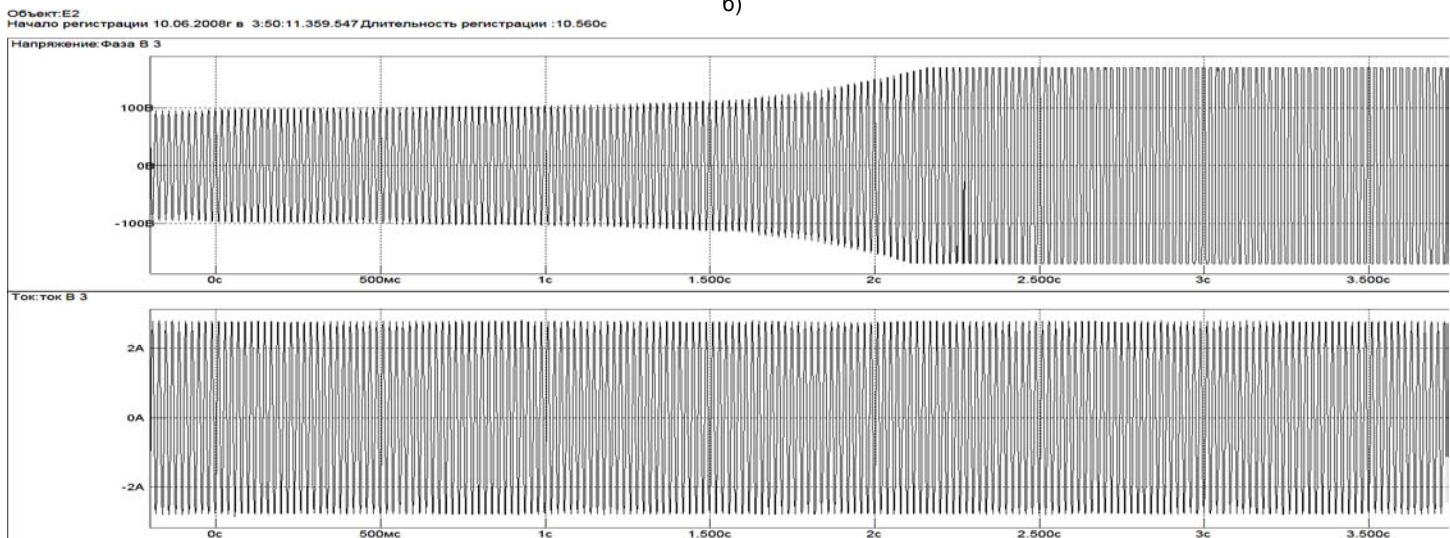
Для определения величин перенапряжений, возникающих в обмотке, быстродействующим аварийным регистратором событий (БАРС) были проведены замеры фазных напряжений и токов при пуске, останове и нормальном режиме работы СД. Результаты измерений приведены на рис. 7.



а)



б)



в)

Рис. 7. Осциллограммы переходных режимов работы электродвигателей: а – пуск ЭГПА 6 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС «Починковская»; б – останов ЭГПА 5 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС «Починковская»; в – ЭГПА 3 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС «Починковская» в нормальном режиме работы (зафиксированное увеличение напряжения питания)

На рис. 7,а приведена осциллограмма пуска ЭГПА 6 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС «Починковская». Амплитуда напряжения во всех трех фазах в первый момент после пуска составляла 7,5 кВ (действующее значение 5,2 кВ), наибольшая амплитуда пускового тока составила 8 998 А (действующее значение 6 248 А). На рис. 7,б при останове ЭГПА 5 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС «Починковская» зафиксировано увеличение амплитуды фазного напряжения с 9,1 кВ (действующее значение 6,3 кВ) до 9 кВ (действующее значение 6,7 кВ) в течение 51,87 мс.

На рис. 7,в зафиксировано увеличение амплитуды фазного напряжения по фазе В на ЭГПА 3 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС «Починковская» с 9,6 кВ (действующее значение 6,7 кВ) до величины 17 кВ (действующее значение 11,8 кВ). Фактическая величина амплитуды фазного напряжения по фазе В была еще выше, однако сработали ограничители напряжения по входным каналам БАРС. Запись осциллограммы велась в автоматическом режиме в течение 10,56 с. Питание данного компрессорного цеха осуществляется от сети 10 кВ с использованием частичного заземления нейтрали через низкоомный резистор (150 Ом), в связи с чем возникновение феррорезонансных явлений в трансформаторах напряжения можно исключить. Для определения причин такого рода явлений необходимо проводить дополнительные исследования режимов работы СД и питающей их сети.

Перенапряжения при коммутациях и режимных возмущениях питающей сети. Наибольшие уровни перенапряжений на изоляции СД могут возникать:

- при грозовых перенапряжениях;
- дуговых однофазных замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью;
- включении электродвигателя при пуске;
- отключении электродвигателя в нормальных и аварийных режимах.

В результате анализа схем электропитания и теоретических расчетов [7] определены параметры перенапряжений, возникающих в различных переходных режимах работы электродвигателей электроприводных КС «Сеченовская».

На рис. 8 приведены результаты моделирования процесса возникновения перенапряжений [6], имеющих наибольшую кратность, полученные с помощью компьютерной программы NRAST.

Таким образом, уровень перенапряжений, воздействующих на изоляцию СД, может достигать 4,5 о.е.

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

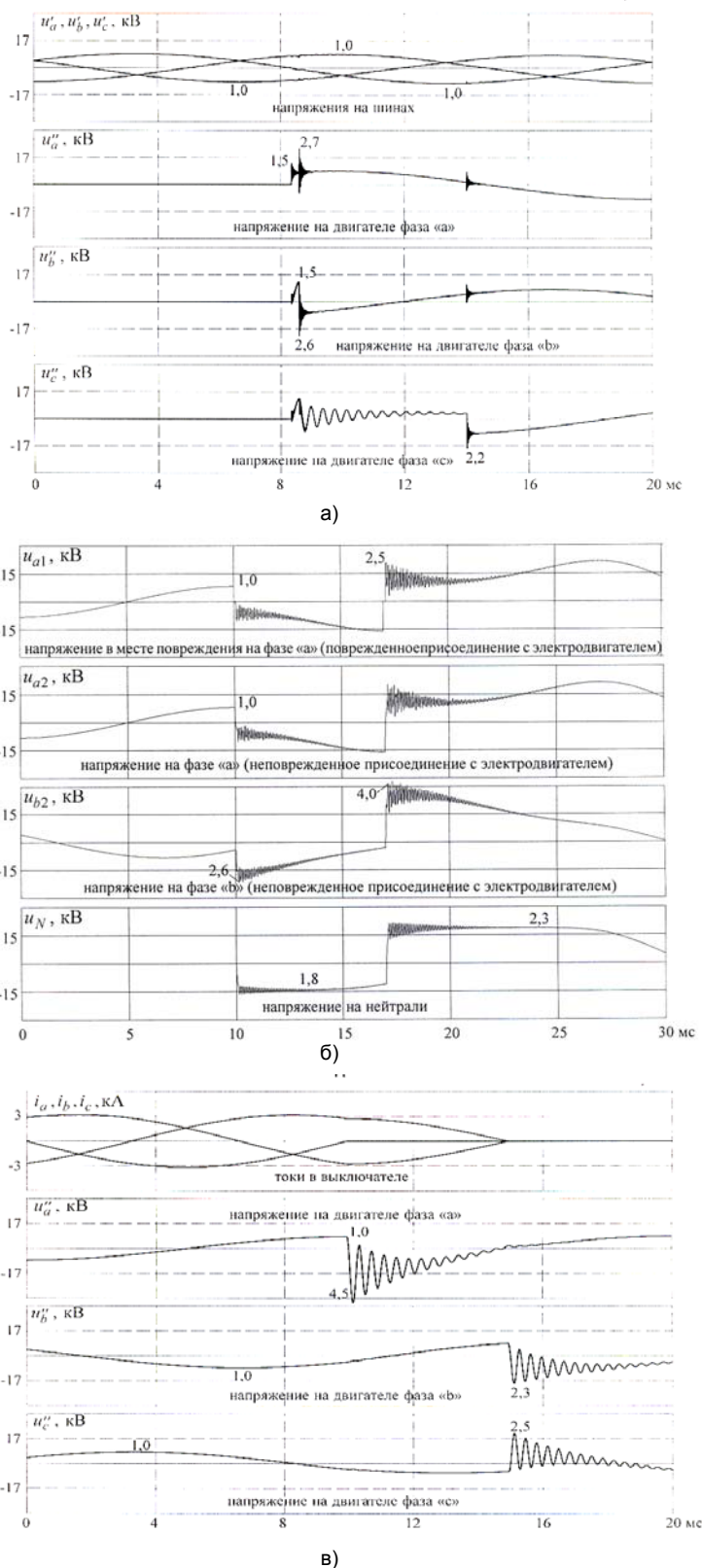


Рис. 8. Результаты компьютерного моделирования перенапряжений на обмотках СД: а – пуск электродвигателя СТД-12500-2 при одновременном замыкании контактов в фазах выключателя (максимальная кратность перенапряжения 2,7 о.е.); б – дуговое однофазное замыкание на землю в сети с электродвигателями СТД-12500-2, подключенными через реакторы (максимальная кратность перенапряжения 4,0 о.е.); в – отключение выпавшего из синхронизма электродвигателя СТД-12500 (максимальная кратность перенапряжения 4,5 о.е.)

В установившихся режимах работы витковая и корпусная изоляция обмоток подвергается действию относительно незначительных электродинамических усилий [7]. Удельное усилие на единицу длины стержня, находящегося в пазу, может быть определено по формуле, кг/см²,

$$P = 6,4 \cdot 10^{-8} \frac{I^2}{b_n},$$

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

Предельные значения удельных амплитудных электродинамических давлений не превышают 1 кг/см². Значительно более высоких значений достигают усилия, действующие на обмотку в переходных режимах и, в частности, при реакторном пуске электродвигателя. С учетом проведенных замеров пусковых токов значение предельного электродинамического давления на изоляцию у дна паза составляет 25 кг/см².

Наряду с усилиями, действующими на стержни обмотки в радиальном направлении и вызывающими их спрессовку, в пазовой части действуют также тангенциальные пульсирующие усилия, прижимающие стержни к стенке паза. Величина этих усилий может быть подсчитана по формуле, кг/см²,

$$P = 1,02 \cdot H \cdot J \cdot 10^{-7},$$

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

Для электродвигателей СТД-12500-2 величина радиального удельного усилия на 1 м длины стержня не превышает 1,5 кг.

Заключение

По результатам проведенного анализа статистических данных, в настоящее время средняя аварийность электродвигателей ГПА из-за повреждений обмоток статора составляет 2,7 ед/год

На ЭГПА отсутствуют системы контроля, позволяющие обслуживающему персоналу проводить сбор, обработку и комплексный оперативный анализ режима работы электродвигателя.

Бабичев Сергей Александрович,
ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород»,
ведущий инженер отдела главного энергетика,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
аспирант,
телефоны: (831) 4-311-294, 8-910-398-40-33,
e-mail: s.babichev@vtg.gazprom.ru

В процессе эксплуатации электродвигатели периодически работают с превышением допустимых параметров, что приводит к ускоренному старению изоляции и выходу из строя статоров.

Повышение надежности работы электродвигателей необходимо осуществлять по нескольким направлениям:

- улучшение эффективности систем охлаждения;
- поддержание заданного напряжения на секциях шин 10 кВ с использованием РПН питающих трансформаторов и перевод АРВ систем возбуждения СД на закон регулирования по поддержанию напряжения на секциях шин 10 кВ;
- внедрение мероприятий по ограничению коммутационных перенапряжений на изоляцию СД;
- внедрение систем частотного пуска ЭГПА.

Для увеличения ресурса электродвигателей ЭГПА, повышения их энергоэффективности и снижения затрат на ремонтные работы необходимы разработка и внедрение систем оперативной параметрической он-лайн диагностики и прогнозирования технического состояния.

Список литературы

1. Бабичев С.А., Папков Б.В. Надежность приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов: Тр. XVII Всерос. конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». – Н. Новгород, 2007. – С. 495–496.
2. ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84). Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.
3. Двигатели синхронные трехфазные СТД / Техническое описание и инструкция по эксплуатации ОВЖ.412.041 ТО. – Лысьва.
4. Методика по техническому диагностированию электропривода газоперекачивающих агрегатов организаций ОАО «Газпром» / Диагностика энергетического оборудования: Информационный сб. № 4. – М., 2004. – С. 62–92.
5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
6. Отчет по исследовательской работе «Ограничение перенапряжений и изменение режима заземления нейтрали в электрических сетях КС «Сеченовская». – СПб.: АЦИА, 2003.
7. Условия работы изоляции обмоток крупных электрических машин и предъявляемые к ней требования. – М.: Отд-е ВНИИЭМ Информэлектро, 1972.