

УДК 62-52-83:656.56

О.В. Крюков

АО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, Россия

ПУСК ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Рассмотрены эксплуатационные режимы работы турбокомпрессоров в качестве газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов. Проведен анализ статистических данных аварийности электроприводных агрегатов на компрессорных станциях магистрального транспорта газа в зависимости от режимов работы и мест повреждений. Обоснована необходимость повышения безопасности функционирования электроприводных турбокомпрессоров путем оптимизации протекания переходных режимов путем снижения динамических составляющих токов и моментов синхронной машины мегаваттного класса. Рассмотрены электромагнитные и электромеханические процессы, происходящие в электроприводе при работе на турбокомпрессорную нагрузку. Приведены примеры модернизации существующих электрических машин в соответствии с требованиями пусковых режимов газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях. Проанализированы варианты сопоставления существующих и инновационных систем безопасного пуска синхронных электродвигателей электроприводных газоперекачивающих агрегатов с использованием новейших методов, технических средств и алгоритмов управления запуском. Обоснована необходимость контроля и оптимизации основных электродинамических параметров приводного электродвигателя газоперекачивающего агрегата в соответствии с режимом перекачки газа и технических параметров машин и смежных агрегатов, работающих по параллельной схеме. Получены результаты компьютерного моделирования пусковых режимов электроприводных агрегатов с устройствами реакторного, плавного, квазичастотного и частотного пуска. Сопоставлены основные значения динамических составляющих тока статора, электромагнитного момента и потокосцепления, а также значения параметров электромагнитной совместимости с питающей сетью среднего напряжения. Показано, что наименьшее влияние на сеть оказывает процесс частотного пуска синхронных машин, обеспечивая соблюдение стандартных показателей совместимости. Разработаны методические, аппаратные и алгоритмические средства для оперативного управления двигателями турбокомпрессоров большой мощности в динамических режимах.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, электропривод, синхронный электродвигатель, реакторный пуск, устройство плавного пуска, преобразователь частоты.

O.V. Kryukov

JSC «Giprogazcenter», Nizhny Novgorod, Russian Federation

START-UP OF ELECTRODRIVING GAS-COMPRESSOR UNITS

Operational operating modes of turbocompressors as gas-distributing units of compressor stations of the main gas pipelines are considered. The analysis of statistical data of breakdown rate of electrodriving units at compressor stations of the main transport of gas depending on operating modes and places of damages is carried out. Need of increase in safety of functioning of electrodriving turbocompressors by optimization of course of the transitional modes by decrease in dynamic compo-

nents of currents and the moments of the synchronous car of a megawatt class is proved. The electromagnetic and electromechanical processes happening in the electric drive during the work on turbocompressor loading are considered. Examples of modernization of the existing electrical machines according to requirements of the starting modes of gas-distributing units at compressor stations are given. Examples of modernization of the existing electrical machines according to requirements of the starting modes of gas-distributing units at compressor stations are given. Options of comparison of the existing and innovative systems of safe launch of synchronous electric motors of electrodriving gas-distributing units to use of the latest methods, technical means and control algorithms of start are analysed. Need of control and optimization of the key electrodynamic parameters of the driving electric motor of the gas-distributing unit according to the mode of pumping of gas and technical parameters of the cars and adjacent units working according to the parallel scheme is proved. Results of computer modeling of the starting modes of electrodriving units with devices of reactor, smooth, quasifrequency and frequency start-up are received. Major importances of dynamic components of current of the stator, the electromagnetic moment and flux linkage, and also value of parameters of electromagnetic compatibility with a power line of average tension are compared. It is shown that the smallest impact on network is exerted by process of frequency launch of synchronous cars, providing observance of standard indicators of compatibility. Methodical, hardware and algorithmic means are developed for operational management of engines of turbocompressors of big power in the dynamic modes.

Keywords: gas-distributing unit, electric drive, synchronous electric motor, reactor start-up, device of smooth start-up, frequency converter.

Введение. Центробежные нагнетатели или турбокомпрессоры, работающие в совокупности с приводом в качестве газоперекачивающих агрегатов магистральных газопроводов (МГ), являются основными технологическими установками компрессорных станций (КС) Единой системы газоснабжения России [1–4]. Электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) на базе синхронных машин мощностью 4–25 МВт по своим функциональным возможностям, энергетическим характеристикам и надежности значительно превосходят другие типы привода КС [5–8].

Высоковольтные электрические машины переменного тока ЭГПА большой мощности стали применять на КС ПАО «Газпром» с середины 70-х гг. прошлого века. В основном это синхронные двигатели серии СТД-12500 производства Лысьвенского турбогенераторного завода [1, 5, 7]. Анализ эксплуатации этих двигателей в типовых схемах включения выявил некоторые недостатки, ухудшающие условия технологии компримирования газа в различных режимах [9–13].

Анализ статистики функционирования ЭГПА в переходных режимах. Аварийные остановы ЭГПА на КС происходят по различным причинам. Это и отказы механических узлов основных агрегатов и вспомогательного электрооборудования, аварийные отключения питающих воздушных линий 220 кВ подстанций «глубокого» ввода 220/10 кВ КС, отказы систем управления и защит. Однако все эти отказы малозатратны и устраняются, как правило, за время от получаса до нескольких десятков часов.

Наиболее серьезным повреждением ЭГПА является выход из строя статора приводного высоковольтного синхронного электродвигателя типа СТД-12500-2 или СДГ-12500-2, при котором турбокомпрессор на длительный срок выводится из эксплуатации для проведения дорогостоящего капитального ремонта. Анализ повреждаемости приводных высоковольтных двигателей ЭГПА-12,5 на КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» за период с 1985 по 2007 г. [10–13] показал, что всего за указанный период эксплуатации зафиксировано 62 случая выхода из строя СТД. В табл. 1 приведены данные о распределении повреждений в зависимости от условий эксплуатации ЭГПА.

Таблица 1

Данные о распределении повреждений в зависимости от условий эксплуатации ЭГПА

Условия возникновения повреждения статора СТД	Количество повреждений, %
В статическом режиме при рабочем напряжении питания	52
При перенапряжениях от однофазных замыканий в питающей сети	15
При прямом пуске	15
Механические и термические повреждения	10
При проведении высоковольтных испытаний	8

Результаты распределения повреждений показывают, что наибольшее количество выходов из строя ЭГПА связано с электрическим пробоем изоляции в пазовой части обмотки. По данным аварийной статистики ЭГПА в соответствии с выражением потока отказов выполнен расчет изменения эксплуатационной надежности ЭГПА за анализируемый период. При этом интерполяционной функцией потока отказов является кривая, близкая к параболе:

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}. \quad (1)$$

Полученные данные практически совпадают с классическими положениями теории надежности, в соответствии с которой при увеличении времени эксплуатации параметр потока отказов оборудования возрастает. Кроме того, статистика отказов, представленная в табл. 1, показывает, что с учетом длительности работы наиболее опасными режимами ЭГПА являются динамические процессы пуска и останова машин. Основными их причинами являются следующие эксплуатационные ограничения, связанные с прямым реакторным пуском машин:

– ограниченное количество пусков СТД (до 150), после которых необходимы ремонт ротора и мониторинг обмоток статора;

– по условиям завода-изготовителя допускается только два пуска с разгруженным центробежным нагнетателем из холодного состояния с перерывами между пусками 15 мин или только 1 пуск из горячего состояния;

– пуск электродвигателя ЭГПА допускается только при пониженном напряжении сети и разгруженном агрегате.

Повышение нагрузки на валу ЭГПА не приводит к значительному росту температуры статора в динамике. Наиболее существенное влияние на температурный режим электродвигателя оказывают исправность или эффективность работы системы охлаждения, а также величина температуры охлаждающего воздуха. На рис. 1 представлены экспериментальные данные нагрева обмоток для электродвигателя типа СТД-12500, полученные в ходе измерений при его пусках:

1. При пуске температура статора двигателя из холодного состояния ($30\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$) до рабочей ($65\text{--}75\text{ }^{\circ}\text{C}$) изменяется более чем за 2 ч. При этом не происходит резкого увеличения температуры обмотки. Постоянная времени нагрева при пуске составляет около 10 мин.

2. После отключения электродвигателя (из-за отсутствия охлаждения) температура статора за 3–5 мин поднимается выше рабочей на $15\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и происходит тепловой удар, что может приводить к значительным термомеханическим нагрузкам. Постоянная времени нагрева при останове составляет около 90 мин.

Теоретическое обоснование. Физика процесса пуска мощных двигателей переменного тока одинакова, несмотря на различие их характеристик и принципов работы, и производится по типовой кривой асинхронного двигателя. Этот процесс сопровождается большими (5–7-кратными) бросками тока статора при небольшой кратности (1,5–2,5) электромагнитного момента. Это объясняется наличием большого реактивного тока и низкого коэффициента мощности ($\cos\varphi \approx 0,2$ в отличие от номинального $\approx 0,85$) при скольжениях, близких к единице. Частые и затянутые пуски под нагрузкой приводят к значительным электродинамическим усилиям в роторе (выпучивание стержней обмоток, вылетание петушков и поломки валов), перегреву и старению изоляции статорных обмоток (при перегреве на $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ срок службы снижается вдвое).

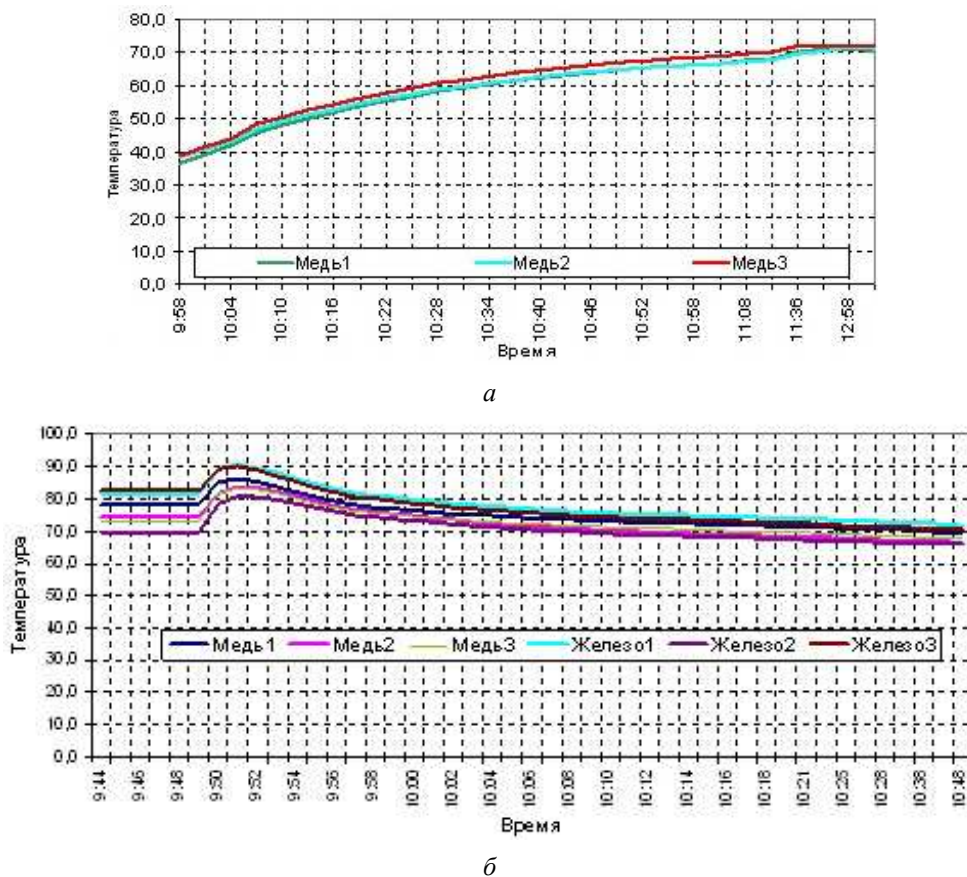


Рис. 1. Изменение температуры статора СТД-12500-2 ЭГПА 6 КЦ МГ «Ямбург-Елец2» КС-25«Починковская после реакторного пуска (а) и останова на выбеге (б)

На рис. 2 показаны результаты пробоя изоляции двигателя при пуске. Место пробоя изоляции – середина верхнего стержня фазы С. В пазу № 33 рабочее напряжение относительно корпуса составляет 6 000 В. Произошло расслоение изоляции и последующий пробой в пазовой части обмотки в результате одновременного воздействия температуры и частичных разрядов.

Решение вопроса плавного пуска для двигателей переменного тока связано с применением специальных машин с повышенным критическим скольжением и пусковым моментом либо многоскоростных машин – с переключением числа пар полюсов. Однако такие машины выпускаются на небольшую мощность, низкое напряжение и имеют увеличенные массу, габариты и стоимость.



Рис. 2. Фрагменты стержня обмотки поврежденного электродвигателя СТД-12500-2 ЭГПА 1 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС-24 Сеченовская

В 1987 г. был изготовлен и прошел испытания синхронный двигатель серии СДГ-12500-2 для контейнерных ЭГПА, в котором были учтены недостатки СТД-12500. Испытания его на КС «Помары» показали следующие его возможности, а именно: прямой пуск, самозапуск, пуск с заполненным контуром центробежного нагнетателя (при давлении на входе 5,0 МПа). Также был установлен дополнительный вентилятор для усиленного охлаждения обмоток при повторном пуске.

В 1997 г. прошел испытания и был принят в эксплуатацию на КС «Балашов» электродвигатель СДГМ-12500-2, который имеет те же эксплуатационные характеристики, что и СДГ-12500-2. Он унифицирован с типовым СТД-12500 по установочным и присоединительным размерам, что позволяет размещать его на фундаменте электродвигателя СТД-12500-2 [1, 4, 9].

Однако конструктивные доработки роторов электродвигателей серий СТД, СДГ и СДГМ не вносят достаточных изменений в улучшение пусковых характеристик двигателей. Их прямой пуск по-прежнему является причиной больших пусковых токов, разрушающих изоляцию обмоток из-за больших электродинамических усилий и ускоренного старения изоляции.

Кроме того, прямые пуски СТД по-прежнему сопровождаются:

- повышением нагрузки на электрические сети (провалы напряжения, влияющие на устойчивость других двигателей узлов нагрузки КС);
- неконтролируемые переходные процессы в двигателях, приводящие к большим переходным моментам, отрицательно влияющим на все элементы кинематической схемы привода.

Таким образом, прямой или реакторный пуск СТД по-прежнему является аварийно опасным режимом работы любого ЭГПА.

Анализ способов и схемных решений пуска ЭГПА. Для устранения проблем, связанных с прямым пуском СТД, используются следующие способы:

- пуск СТД по асинхронной характеристике с предвключенным токоограничивающим индуктивным сопротивлением в статорных обмотках (реакторный, автотрансформаторный и т.п.);

- использование устройств мягкого пуска с регулированием напряжения статора и тока возбуждения двигателя;

- частотный пуск ЭГПА (с нагрузкой или разгруженным нагнетателем) с использованием полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ);

- пуск СТД с применением разгонного двигателя (машин постоянного тока, асинхронных и др.);

- пуск СТД методом инвертирования центробежного нагнетателя путем перевода его в турбодетандерный режим.

Последние два способа редко находят применение на КС МГ из-за отсутствия технических возможностей их реализации.

Использование предвключенных в статорную цепь реакторов и трансформаторов в качестве добавочных реактивных токоограничивающих сопротивлений также ограничено малыми и средними мощностями двигателей и в принципе не решает вопрос для мощных СТД из-за снижения динамического момента. К тому же большие и длительные пусковые токи при этом сохраняются, увеличивая продолжительность запуска в 3–5 раз (так как площади под кривыми динамического момента должны быть одинаковыми для создания энергии вращающихся масс ротора с учетом потерь). Наиболее кардинальным способом пуска мощных СТД является использование тиристорных или транзисторных мягких пускателей (МП) и преобразователи частоты (ПЧ). Современные МП для СТД, как и ПЧ, имеют высокую стоимость, большие затраты на ремонт, обслуживание и потребление электроэнергии. Однако эти затраты быстро окупаются, так как срок службы СТД увеличивается в среднем на 5 лет, число пусков – с 50 в несколько раз, а также снижается расход энергии при пуске. Высоковольтные МП выпускаются в двух вариантах структурных схем: с тиристорным регулятором напряжения (ТРН) или с частотным пуском.

В первом варианте МП более простой, состоит из комплекта встречно-параллельных тиристорov (реже IGBT-транзисторов), включенных в каждую фазу питания статорной обмотки СТД. ТРН использует принцип постепенного повышения напряжения, питающего пусковую обмотку СТД (при уменьшении угла управления), начиная с величины, соответствующей значению момента нагрузки на валу.

Однако при этом максимальный момент СТД также уменьшается, приводя к снижению интенсивности разгона на низких скоростях и ухудшению охлаждения машин с самовентиляцией. Кроме того, искажение формы напряжения питания статорной обмотки и сдвиг первой гармоники тока относительно напряжения приводят к необходимости дополнительной компенсации реактивной мощности и завышения суммарной мощности привода (из-за роста на 10–15 % потерь на 5-й и 7-й гармониках тока и электромагнитного момента).

При пуске вхолостую и при вентиляторной нагрузке на валу СТД первый недостаток ТРН незначителен, так как динамический момент двигателя достаточен для надежного пуска привода. Однако при больших нагрузках на валу при пуске этот фактор может привести к «залипанию» ротора, затягиванию и даже невозможности запуска. Этот вопрос решается с помощью специальных алгоритмов квазичастотного и импульсного пуска [14–18].

Второй вариант МП основан на схеме, аналогичной обычному ПЧ на базе автономного инвертора тока. Законом управления может быть, например, $U/f = \text{const}$ или другой оптимизированный под конкретный график нагрузки. Отличие заключается только в меньшей мощности полупроводниковых приборов, работающих в кратковременном режиме с дальнейшим шунтированием пускателя при выходе в номинальный режим. При этом во всем диапазоне пуска сохраняются высокая перегрузочная способность, динамический момент и коэффициент мощности. Выбор варианта пускателя определяется характером нагрузки и особенностями технологического процесса конкретного турбокомпрессора [19, 20]. Основным недостатком использования высоковольтного ПЧ является его высокая стоимость.

В отличие от асинхронных машин, где пусковая обмотка статора является рабочей и рассчитана на оба режима, в СТД эти обмотки разные. Поэтому затянутый пуск СТД может привести к преждевременному выходу из строя всего двигателя, хотя рабочие обмотки будут исправными

и ресурс их ещё не исчерпан. Наличие трех электромагнитных полей, вызванных помимо вынужденной и свободной составляющих еще и колеблющимися полями от поля обмотки возбуждения, приводит к большим пульсациям момента при пуске, чем в асинхронном электродвигателе. Дополнительным каналом воздействия на электромагнитный момент СТД является обмотка возбуждения. Поэтому альтернативным способом ограничения динамических нагрузок является векторное регулирование электромагнитных потоков по цепи возбуждения СТД. Смысл этого регулирования состоит в раскачивании ротора двигателя по определенному закону при помощи увеличения или уменьшения тока возбуждения на холостом ходу. Данное качание ротора в дальнейшем процессе запуска ЭГПА приводит к уменьшению пиков нагрузки.

Помимо этого необходимо уменьшить собственные колебания ротора СТД при помощи соответствующего регулирования, аналогичного описанному в варианте с ПЧ по цепи возбуждения. Основным недостатком такого регулирования является довольно большая постоянная времени обмотки возбуждения – порядка 2,5 с. Поэтому, чтобы реализовать данный способ на практике, необходимо использовать форсировку возбуждения.

Результаты компьютерного моделирования пусковых режимов ЭГПА. На рис. 3 представлены результаты компьютерного моделирования переходных процессов СТД при пуске ЭГПА с рассмотренными выше вариантами пусковых устройств [1, 20].

Рассмотрим подробнее каждую из этих осциллограмм:

а) прямой пуск. Важно отметить количественные показатели основных параметров процесса запуска (рис. 3, а):

- амплитуда знакопеременной составляющей момента в начале пуска достигает значения $M_{p.\max} \approx 3$, что соответствует приблизительно 4-кратному значению по отношению к номинальному моменту; частота для этой составляющей составляет 50 Гц;

- темп изменения электромагнитного момента достигает $dM/dt \approx 750 \text{ с}^{-1}$;

- модуль вектора токов статора и его фазный ток в самом начале процесса достигают значения $I_{s.\max} \approx 12,5$, и только затем происходит снижение его до установившегося пускового тока $I_{s.dst} \approx 6,5$;

- в процессе пуска имеют место значительные колебания момента, особенно значительные при приближении к синхронной скорости;

амплитуда колебаний момента достигает $M_{pm} \approx 1$ (120 % $M_{ном}$); частота колебаний снижается по мере приближения к синхронной скорости вращения;

– переменная, определяющая отклонение напряжения в узле нагрузки, достигает значения $H_{max} \approx 8$.

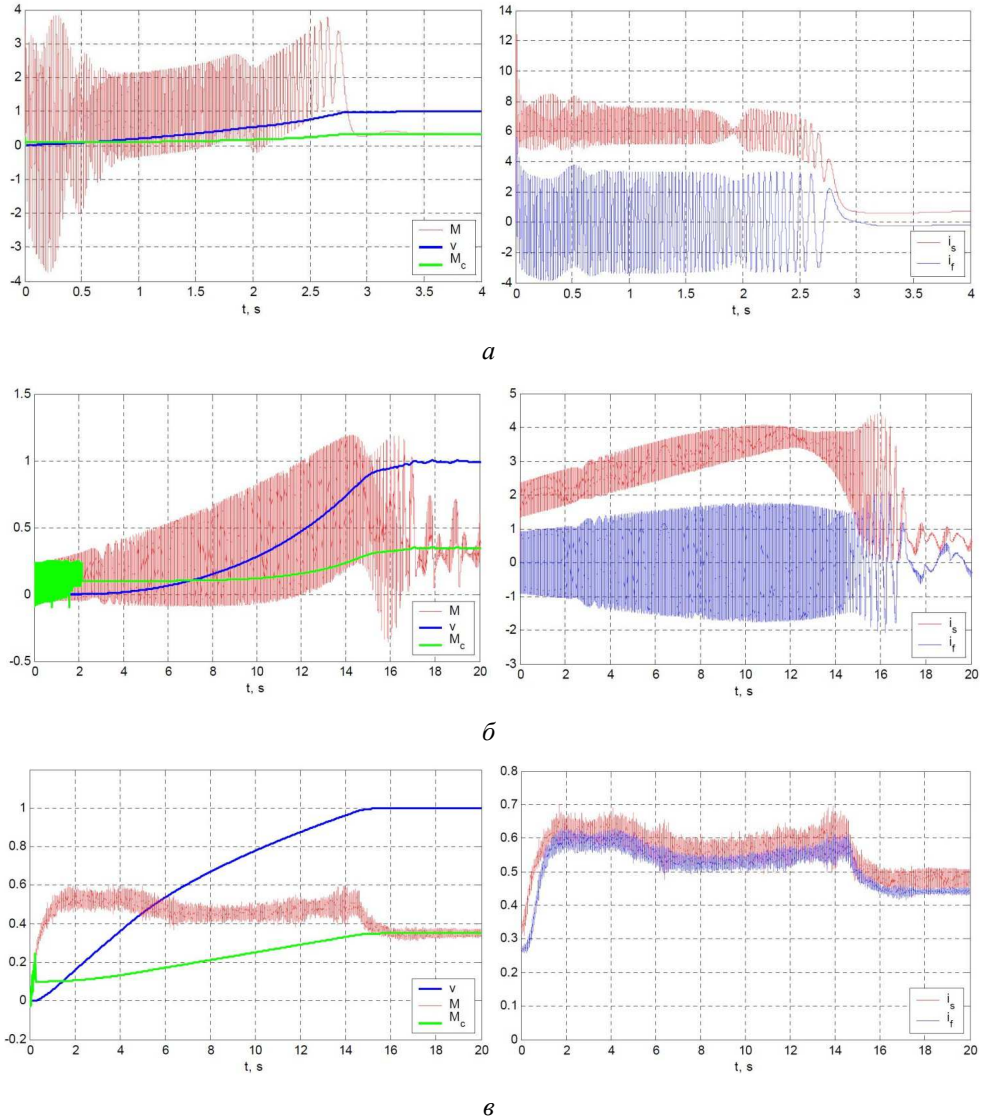


Рис. 3. Переходные характеристики скорости (v), моментов (M и M_c), токов статора (i_s), возбуждения (i_f) и напряжения в узле нагрузки ($\omega L * p i s$) способов запуска СТД: а – прямой, б – мягкий, в – частотный

Значительный ударный момент и особенно высокий темп изменения электромагнитного момента являются важнейшими факторами, влияющими на прочность и надёжность двигателя и механизма. Дополнительное разрушающее воздействие на механическую часть оказывают НЧ колебания момента на завершающей стадии пуска. Ударный ток $I_{s,max} \approx 12,5$ определяет огромное усилие, вдавливающее проводники статора в пазы; он является важнейшим отрицательным фактором, влияющим на срок службы статорных обмоток СТД.

Высокое максимальное значение H_{max} определяет значительное отклонение напряжения в узле нагрузки, от которого питается ЭГПА. Максимальное отклонение мгновенного напряжения при прямом пуске составляет 35 %, что является значительным. Понятно, что при таком значении отклонения максимальные значения пускового тока и переменной h уменьшены по сравнению с рассмотренным идеальным случаем. Но при этом, тем не менее, посадка напряжения оказывается недопустимой для многих смежных электроприёмников, в особенности для регулируемых электроприводов.

Практический опыт применения реакторного пуска СТД-12500-2 на электроприводных КС ОАО «Газпром» с реактором РБУ-10-1000-0,22 при простоте его реализации выявил ряд недостатков и технически неприемлем по следующим причинам [1, 4, 5]:

- пусковые токи вызывают перегрев обмоток статора и ротора двигателя;

- возникновение ударных электродинамических нагрузок приводит к деформации лобовых частей обмоток статора и ротора, скручивающей деформации вала, смещению пазовых клиньев ротора, осевым сдвигам относительно статора;

- отмечены провалы напряжения на шинах 10 кВ и нарушение устойчивости синхронных двигателей других агрегатов КС;

- сохранены ограничения по пусковым режимам СТД ЭГПА;

- необходимо проводить периодические осмотры ротора двигателя.

Каждый реакторный пуск приводит к сокращению общего ресурса двигателя в среднем на 260 ч [7, 20];

б) мягкий пуск. Как видно из рис. 3, б, по сравнению с прямым пуском при плавном (мягком) исключаются колебания момента большой амплитуды при стоящем СТД, а также отсутствует ударный ток в момент включения. Однако не исключаются значительные ко-

лебания момента при подходе к подсинхронной скорости. В отношении воздействия на питающую сеть плавный пуск не даёт существенного эффекта по сравнению с прямым пуском – амплитуда фазных токов в процессе пуска равна примерно 4-кратной по отношению к амплитуде номинального тока. Форма токов, потребляемых от сети на этапе нарастания выходного напряжения, существенно не синусоидальна. На рис. 3, б показаны процессы для двух периодов питающего напряжения в процессе пуска, при этом максимальное значение $H_{\max} \approx 8$ примерно такое же, как при прямом пуске. Отклонение и искажение напряжения в узле нагрузки, вероятнее всего, выйдут из допустимых пределов по ГОСТу.

Мягкий пуск двигателя ЭГПА на практике осуществляется регулированием напряжения в статорной обмотке с помощью ТРН, в который введены замкнутая САР тока и устройство параметрического (функции времени) задания амплитуды тока. В результате такого мягкого пуска, например в системе «Квант-Э1», реализуется заданное ограничение тока и момента двигателя;

в) частотный пуск СТД осуществляется от ПЧ [21–24] путем плавного увеличения частоты и напряжения в статорной обмотке от начального до номинального значения по установленному закону $U/f = \text{const}$, $U/f^2 = \text{const}$ за определенный интервал времени до достижения двигателем синхронной частоты вращения. В течение всего времени пуска ток СТД поддерживается в пределах $0,54 \dots 1,5 I_{\text{ном}}$. При этом указанные недостатки прямого реакторного и мягкого фазового пусков отсутствуют. После завершения пуска ПЧ шунтируется контактным аппаратом, и ЭГПА продолжает работу напрямую от сети. По сравнению с прямым пуском частотный обеспечивает:

- уменьшение пускового тока от 6,5-кратного до 0,65 по отношению к номинальному;
- устранение первоначального удара тока (12-кратной амплитуды номинального тока);
- уменьшение максимального усилия на изоляцию проводников статора в 100 раз;
- устранение пульсаций момента на начальной стадии пуска (с амплитудой порядка $4 M_{\text{ном}}$);
- уменьшение темпа изменения момента примерно в 1000 раз;
- снятие ограничений по числу пусков;

– устранение неблагоприятного воздействия на питающую сеть – кратность максимального тока, потребляемого ПЧ от сети, примерно равна кратности максимального тока статора.

Кроме того, по сравнению с ранее рассмотренными вариантами частотный пуск обеспечивает значительно меньшее искажение напряжения в сети [25–29]. Форма первичного тока, показанная на рис. 3, в, мало отличается от синусоидальной. Максимальное значение $H_{\max} \approx 1,5$, что в 5 раз меньше, чем при прямом пуске или с МП. Соответственно и отклонение мгновенного напряжения уменьшено в таком же соотношении. Для рассмотренного примера с током короткого замыкания в узле нагрузки $I_{sc} = 8$ кА максимальное отклонение мгновенного напряжения составит всего лишь $\Delta UL_{\max} \approx 0,07$ или 7 %. Такое отклонение заведомо приемлемо для любых смежных электроприёмников [30–37]. В приведенной ниже табл. 2 сопоставлены итоги результатов компьютерного моделирования способов прямого (приняты за 1), плавного (мягкого) и частотного пуска СД.

Таблица 2

Относительные показатели способов пуска ЭГПА

Показатели	Прямой пуск (реакторный)	Плавный пуск	Частотный пуск
Максимальное значение тока статора	1	0,38	0,06
Нагрев обмоток статора за время пуска	1	1	0,1
Максимальный электромагнитный момент	1	0,34	0,17
Амплитуда низкочастотных колебаний момента	1	0,6	0
Максимальное отклонение мгновенного напряжения в узле нагрузки	1	1	0,19

Выводы

1. Использование устройства плавного асинхронного пуска СД для рассматриваемого класса турбомеханизмов частично снижает ударные нагрузки на механическую часть и электрооборудование. Однако оно не устраняет НЧ колебаний момента в зоне подсинхронных скоростей.

2. Применение МП для эксплуатируемых ЭГПА не устраняет неблагоприятное воздействие пускового тока на питающую сеть.

3. Устройство МП не обеспечивает даже кратковременной работы СД на пониженной скорости для выполнения ремонтных или технологических операций.

4. Радикальное решение задачи пуска мощного СТД ЭГПА обеспечивается только при использовании электропривода с высоковольтным преобразователем частоты. Это решение устраняет все неблагоприятные факторы в отношении условий работы механических узлов и электрооборудования, устраняет вредное воздействие на питающую сеть. Кроме того, обеспечиваются дополнительные возможности для работы на пониженной или ползучей скорости в определённых технологических и ремонтных режимах.

5. Основное преимущество частотного пуска в сравнении с мягким пускателем – регулирование частоты вращения двигателя с нагруженным и разгруженным нагнетателем природного газа с допустимым превышением температуры нагрева электродвигателя и нормами вибрации в процессе разгона. Преимуществом МП является относительная конструктивная простота и вследствие этого достаточная надёжность, но большая пульсация пускового момента.

Библиографический список

1. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // Интеллектуальные системы: XI Междунар. симпозиум / под ред. К.А. Пупкова; (Москва, 30 июня – 4 июля 2014 г.). – М.: Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 2014. – С. 458–463.

2. Крюков О.В., Горбатушков А.В., Степанов С.Е. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: тр. IV Всерос. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк, 2010. – С. 38–45.

3. Захаров П.А., Крюков О.В. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях // Вестник Иванов. гос. энергет. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 98–104.

4. Крюков О.В., Серебряков А.В. Методы синтеза встроенных систем прогнозирования технического состояния высоковольтных двигателей // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы МНТК (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2015. – С. 69–73.

5. Аникин Д.А., Рубцова И.Е., Крюков О.В., Киянов Н.В. Проектирование систем управления электроприводными ГПА // Газовая промышленность. – 2009. – № 2. – С. 44–47.

6. Крюков О.В. Анализ моноблочных конструкций электрических машин для газоперекачивающих агрегатов // *Машиностроение: сетевой электрон. науч. журнал.* – 2015. – Т. 3. – № 4. – С. 53–58.

7. Крюков О.В. Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // *Тр. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / отв. за вып. И.В. Гуляев.* – Саранск, 2014. – С. 157–163.

8. Крюков О.В., Степанов С.Е. Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» // *Газовая промышленность.* – 2014. – № 8(710). – С. 50–56.

9. Крюков О.В., Титов В.Г. Анализ пусковых режимов электроприводных газоперекачивающих агрегатов // *Известия вузов. Электромеханика.* – 2012. – № 3. – С. 29–35.

10. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов // *Приводная техника.* – 2010. – № 5. – С. 20–27.

11. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units // *Automation and Remote Control.* – 2011. – Т. 72. – № 6. – С. 175–180.

12. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Автоматизированная система оперативного мониторинга приводных двигателей газоперекачивающих агрегатов // *Автоматизация в промышленности.* – 2009. – № 6. – С. 3–6.

13. Бабичев С.А., Бычков Е.В., Крюков О.В. Анализ технического состояния безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // *Электротехника.* – 2010. – № 9. – С. 30–36.

14. Автоматизированная система плавного пуска синхронного электропривода механизмов с высокомоментной нагрузкой: пат. № 101598 Рос. Федерация / В.И. Воронков, И.Е. Рубцова, С.Е. Степанов, О.В. Крюков, В.Г. Титов; опубл. 05.05.2010.

15. Крюков О.В. Опыт применения систем безопасного пуска электродвигателей большой мощности // *Приводная техника.* – 2011. – № 4. – С. 2–13.

16. Крюков О.В. Анализ систем безопасного пуска электроприводных газоперекачивающих агрегатов // *Компрессорная техника и пневматика.* – 2012. – № 2. – С. 12–18.

17. Степанов С.Е., Крюков О.В., Плехов А.С. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газокompрессорных станций // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 29–31.

18. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа // Тр. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / отв. за вып. И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – Т. 2. – С. 404–409.

19. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15: сб. науч. тр. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2015. – С. 368–386.

20. Пужайло А.Ф. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / под ред. О.В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 560 с.

21. Крюков О.В., Краснов Д.В. Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности электроприводных ГПА // Газовая промышленность. – 2014. – № 6(707). – С. 86–89.

22. Пужайло А.Ф., Крюков О.В., Рубцова И.Е. Энергосбережение в агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода // Наука и техника в газовой промышленности. – 2012. – № 2(50). – С. 98–106.

23. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Т. 84. – С. 135–138.

24. Захаров П.А., Крюков О.В. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64–70.

25. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'12): материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2012. – С. 222–236.

26. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. – 2014. – № 712. – С. 84–87.

27. Крюков О.В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.

28. Крюков О.В., Васенин А.Б., Серебряков А.В. Экспериментальный стенд электромеханической части энергетической установки // Приводная техника. – 2012. – № 4. – С. 2–11.

29. Крюков О.В., Титов В.В. Разработка АСУ автономными энергетическими установками // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 35–37.

30. Крюков О.В. Аппаратные и алгоритмические средства безопасного пуска электродвигателей большой мощности // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 9. – С. 23–30.

31. Крюков О.В., Серебряков А.В., Васенин А.Б. Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3(19). – С. 549–552.

32. Крюков О.В., Степанов С.Е., Бычков Е.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов // Тр. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / отв. за вып. И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – С. 409–414.

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

34. Milov V.R., Suslov V.A., Kryukov O.V. Intellectual management decision support in gas industry // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – № 5. – С. 1095–1101.

35. Крюков О.В. Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52–60.

36. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б. Нечеткие модели и алгоритмы управления энергетическими установками // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах МКПУ-2012: материалы конф. / под ред. С.Н. Васильева. – СПб.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. – С. 467–469.

37. Васенин А.Б., Крюков О.В., Титов В.В. Анализ технико-экономических параметров энергетических установок для объектов ОАО «Газпром» // Приводная техника. – 2011. – № 6. – С. 2–13.

References

1. Kriukov O.V. Strategii invariantnykh elektropri-vodov gazotransportnykh sistem [Strategy of the invariant electric gas transportation systems]. *XI Mezhdunarodnyi simpozium "Intellectual'nye sistemy"*, 30 June – 4 July 2014. Moscow: Rossiiskii universitet druzhby narodov, 2014, pp. 458-463.

2. Kriukov O.V., Gorbatushkov A.V., Stepanov S.E. Printsipy postroeniia invariantnykh elektroprivodov energeticheskikh ob"ektov [Principles of invariant electric power facilities design]. *Trudy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Avtomatizirovannyi elektroprivod i promyshlennnaia elektronika"*. Novokuznetsk, 2010, pp. 38-45.

3. Zakharov P.A., Kriukov O.V. Printsipy invariantnogo upravleniia elektroprivodami gazotransportnykh sistem pri sluchainykh vozmu-shcheniiakh [The principles of the invariant control electronic gas transportation systems with random perturbations]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2008, no. 2, pp. 98-104.

4. Kriukov O.V., Serebriakov A.V. Metody sinteza vstroennykh sistem prognozirovaniia tekhnicheskogo sostoianiia vysokovol'tnykh dvigatelei [Methods of built-in forecasting systems synthesis of high-voltage motor technical position]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (XVIII Benardosovskie chteniia) "Sostoianie i perspektivy razvitiia elektro- i teplotekhnologii"*. Ivanovo, 2015, pp. 69-73.

5. Anikin D.A., Rubtsova I.E., Kriukov O.V., Kiiarov N.V. Proektirovanie sistem upravleniia elektroprivodnymi gazopereka-chivaiushchimi agregatami [Designing the control systems with electrically driven GPA]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2009, no. 2, pp. 44-47.

6. Kriukov O.V. Analiz monoblochnykh konstruksii elektricheskikh mashin dlia gazoperekachivaiushchikh agregatov [Analysis of single block electric machinery for gas-compressor unit]. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 53-58.

7. Kriukov O.V. Opyt sozdaniia energoeffektivnykh elektroprivodov gazoperekachivaiushchikh agregatov [Creation experience of energy-efficient electric motors for gas-compressor units]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014*. Saransk, 2014, vol. 2, pp. 157-163.

8. Kriukov O.V., Stepanov S.E. Povysenie ustoichivosti raboty elektroprivodov tsentrobezhnykh nagnetatelei na kompressornykh stantsiiakh OAO "Gazprom" [Stability improvement of electrically driven centrifugal blower used at JSC "Gasprom" gas-compressor station]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 8(710), pp. 50-56.

9. Kriukov O.V., Titov V.G. Analiz puskovykh rezhimov elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Starting operating mode analysis of electrically driven gas pumping unit]. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika*, 2012, no. 3, pp. 29-35.

10. Kriukov O.V. Sravnitel'nyi analiz privodnoi tekhniki gazoperekachivaiushchikh agregatov [Comparative analysis of gas-compressor unit driven equipment]. *Privodnaia tekhnika*, 2010, no. 5, pp. 20-27.

11. 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. 6, pp. 175-180.

12. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kriukov O.V. Avtomatizirovannaia sistema operativnogo monitoringa privodnykh dvigatelei gazoperekachivaiushchikh agregatov [AS of the on-line monitoring of the gas pumping power unit]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2009, no. 6, pp. 3-6.

13. Babichev S.A., Bychkov E.V., Kriukov O.V. Analiz tekhnicheskogo sostoianniia i bezopasnosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [The analysis of the mechanical condition and the electrically driven gas pumping unit security]. *Elektrotekhnika*, 2010, no. 9, pp. 30-36.

14. Voronkov V.I., Rubtsova I.E., Stepanov S.E., Kriukov O.V., Titov V.G. Avtomatizirovannaia sistema plavnogo puska sinkhronnogo elektroprivoda mekhanizmov s vysokomomentnoi nagruzkoii [Automated system of mechanism synchronous drive soft start with high-tonque load]. *Patent RF No 101598*, 2010.

15. Kriukov O.V. Opyt primeneniia sistem bezopasnogo puska elektrodvigatelei bol'shoi moshchnosti [Application experience of high-power electric engine secure start]. *Privodnaia tekhnika*, 2011, no. 4, pp. 2-13.

16. Kriukov O.V. Analiz sistem bezopasnogo puska elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Analysis of electrically driven pumping unit]. *Kompresornaiia tekhnika i pnevmatika*, 2012, no. 2, pp. 12-18.

17. Stepanov S.E., Kriukov O.V., Plekhov A.S. Printsipy avtomaticheskogo upravleniia vozbuzhdeniem sinkhronnykh mashin gazokompresornykh stantsii [Automatic control principles of synchronous machines gas compressor stations excitation]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2010, no. 6, pp. 29-31.

18. Vasenin A.B., Kriukov O.V., Serebriakov A.V. Algoritmy upravleniia elektromekhanicheskimi sistemami magistral'nogo transporta gaza [Algorithms of trunking gas transfer EMS management]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014*. Saransk, 2014, vol. 2, pp. 404-409.

19. Kriukov O.V. Strategii invariantnykh sistem upravleniia elektroprivodami ob"ektov OAO "Gazprom" [Invariant electrical control systems strategy of the JSC "Gazprom" facilities]. *Identifikatsiia sistem i zadachi upravleniia SICPRO'15*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, 2015, pp. 368-386.

20. Puzhailo A.F. Energoberezhenie i avtomatizatsiia elektrooborudovaniia kompressornykh stantsii: monografiia [Energy saving and electric equipment automation of electrical compressor stations]. Nizhnii Novgorod: Vektor TiS, 2010. 560 p.

21. Kriukov O.V., Krasnov D.V. Perspektivy primeneniia preobrazovatelei chastoty dlia regulirovaniia proizvoditel'nosti elektroprivodnykh GPA [Prospects of frequency convertors use for the electrically driven gas pumping units performance control]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 6(707), pp. 86-89.

22. Puzhailo A.F., Kriukov O.V., Rubtsova I.E. Energoberezhenie v agregatakh kompressornykh stantsii sredstvami chastotno-reguliruемого elektroprivoda [Energy saving in compressor stations units by means of a frequency-controlled electric drive]. *Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti*, 2012, no. 2(50), pp. 98-106.

23. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, pp. 135-138.

24. Zakharov P.A., Kriukov O.V. Metodologiiia invariantnogo upravleniia agregatami kompressornykh stantsii pri sluchainykh vozdeistviakh

[The methodology of the invariant control compressor station units at random input]. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika*, 2009, no. 5, pp. 64-70.

25. Kriukov O.V. Prikladnye zadachi teorii planirovaniia eksperimenta dlia invariantnykh ob"ektov gazotransportnykh sistem [Applied tasks of experimental design theory for the invariant objects of gas transportation system]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Identifikatsiia sistem i zadachi upravleniia (SICPRO'12)"*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, 2012, pp. 222-236.

26. Kriukov O.V., Repin D.G. Sistemy operativnogo monitoringa tekhnicheskogo sostoianiia energoustanovok dlia energeticheskoi bezopasnosti kompressornykh stantsii [Power plant technical position on-line monitoring systems for compressor plant energy security]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 712, pp. 84-87.

27. Kriukov O.V. Virtual'nyi datchik nagruzki sinkhronnykh mashin [Virtually load sensing element of synchronous machines]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont*, 2014, no. 3, pp. 45-50.

28. Kriukov O.V., Vasenin A.B., Serebriakov A.V. Eksperimental'nyi stend elektromekhanicheskoi chasti energeticheskoi ustanovki [Test bench of the electromechanical section of the wind driven generator unit]. *Privodnaia tekhnika*, 2012, no. 4, pp. 2-11.

29. Kriukov O.V., Titov V.V. Razrabotka ASU avtonomnymi energeticheskimi ustanovkami [Stand-alone power plant automated control systems development]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2009, no. 4, pp. 35-37.

30. Kriukov O.V. Apparatnye i algoritmicheskie sredstva bezopasnogo puska elektrodvigatelei bol'shoi moshchnosti [Hardware and algorithmic means of high power electric engine secure start]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont*, 2013, no. 9, pp. 23-30.

31. Kriukov O.V., Serebriakov A.V., Vasenin A.B. Diagnostika elektromekhanicheskoi chasti vetroenergeticheskikh ustanovok [Electromechanical part test operation of wind-driven power plant]. *Elektromekhanichni i energozberigaiuchi sistemi*, 2012, no. 3(19), pp. 549-552.

32. Kriukov O.V., Stepanov S.E., Bychkov E.V. Invariantnye sistemy tekhnologicheski sviazannykh elektroprivodov ob"ektov magistral'nykh gazoprovodov [Invariant systems of technologically connected electric drives of main gas pipelines objects]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu, 7-9 October 2014*. Saransk: Mordovskii gosudarstvennyi universitet imeni N.P. Ogareva, 2014, vol. 2, pp. 409-414.

33. Khlynin A.S., Kriukov O.V. Realizatsiia faktorov energoeffektivnosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov v proektakh [Implementing electrically driven gas pumping units energy efficiency in projects]. *Elektrotehnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 32-37.

34. Milov V.R., Suslov B.A., Kryukov O.V. Intellectual management decision support in gas industry. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 5, pp. 1095-1101.

35. Kriukov O.V. Metodologiya i sredstva neiro-nechetkogo prognozirovaniia sostoianiia elektroprivodov gazoperekachivaiushchikh agregatov [Methodology and means of gas pumping unit electric drives neuron fuzzy forecasting]. *Elektrotehnika*, 2012, no. 9, pp. 52-60.

36. Serebriakov A.V., Kriukov O.V., Vasenin A.B. Nechetkie modeli i algoritmy upravleniia vetroenergeticheskimi ustanovkami [Fuzzy models and the wind power plant control algorithms]. *Materialy konferentsii "Upravlenie v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh"*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, pp. 467-469.

37. Vasenin A.B., Kriukov O.V., Titov V.V. Analiz tekhniko-ekonomicheskikh parametrov energeticheskikh ustanovok dlia ob"ektov OAO "Gazprom" [Analysis of electric power plant performance parameters for OJSC "Gazprom" objects]. *Privodnaia tekhnika*, 2011, no. 6, pp. 2-13.

Сведения об авторе

Крюков Олег Викторович (Нижний Новгород, Россия) – доктор технических наук, доцент, главный специалист АО «Гипрогазцентр» (603950, Н. Новгород, ГСП-926, ул. Алексеевская, 26, тел./факс. (831)428-25-84, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru).

About the author

Kryukov Oleg Victorovich (Nizhny Novgorod, Russian Federation) is a Doctor of Technical Science, Associate Professor, Main Expert of JSC «Giprogazcenter» (603950, Nizhny Novgorod, 26, Alekseevskaya str., GSP-926, tel./fax.: (831)428-25-84, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru).

Получено 12.10.2016