

УДК 62-83: 656.56

С.Е. Степанов

АО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, Россия

ВЫБОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОГО ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассмотрены перспективы частотного регулирования производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях магистрального транспорта газа. Представлен анализ особенностей топологии и энергетических характеристик современных высоковольтных преобразователей частоты для модернизации и нового строительства электроприводных компрессорных станций на объектах ПАО «Газпром». Рассмотрены особенности схемных структур и функциональных возможностей многоуровневых преобразователей отечественного производства для повышения энергоэффективности и надежности газоперекачивающих агрегатов. Проведено моделирование гармонического состава выходного напряжения и тока высоковольтных преобразователей частоты, выполненных по различной топологии, как без выходного фильтра, так и с синусным выходным фильтром при работе в системах регулируемых приводов центробежных нагнетателей. При моделировании были определены параметры Г-образных LC-фильтров, позволяющих снизить коэффициент THD до допустимого значения. Получены осциллограммы выходных характеристик и гармонические спектры параметров пяти наиболее типичных структур преобразователей частоты при работе на активно-индуктивную нагрузку различной мощности во всем диапазоне регулирования скорости. Представлены результаты расчета коэффициентов искажения выходного напряжения и тока и соответствующие уровни спектров частот напряжения при частоте ШИМ 550 Гц и частоте инвертора 15–50 Гц для многоуровневых инверторов. Выявлена целесообразность применения для некоторых типов преобразователей фильтрокомпенсирующих устройств для различных зон регулирования. Получены сводные параметры синусных фильтров для различных типов частотно-регулируемого привода ЭГПА на напряжение 6 (10) кВ.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, частотно-регулируемый электропривод, высоковольтный преобразователь частоты, электродвигатель переменного тока, автономный инвертор напряжения, гармонический состав тока и напряжения.

S.E. Stepanov

JSC «Giprogazcenter», Nizhny Novgorod, Russian Federation

THE CHOICE OF HIGH-VOLTAGE FREQUENCY CONVERTERS FOR GAS-PUMPING ELECTRIC DRIVE UNIT BY MODELLING OF THEIR CHARACTERISTICS

The prospects of frequency control performance of electrically driven gas compressor units at compressor stations of gas mains. Presents the analysis of peculiarities of the topology and energetic characteristics of modern high-voltage frequency converters for the modernization and new construction of electrically driven compressor stations on the objects of PJSC "Gazprom". Considered design features of structures and functionality of multilevel converters domestic production to improve energy efficiency and reliability of gas compressor units. The simulation of the harmonic composition of output voltage and current of high-voltage frequency converters made by different topology, as without an output filter, and a sine output filter when operating in the systems of adjustable drives of centrifugal compressors. In the simulation determined parameters of the I-shaped LC-filter to reduce the ratio of THD to an acceptable value. The resulting output characteristics waveforms and harmonic spectra of the 5 most typical parameters of the structures of the frequency converters when working on an active-inductive loads of different power in the entire speed control range. The results of the calculation of the coefficients of distortion of the output voltage and current and the respective levels of spectra of frequencies of voltage when the PWM frequency is 550 Hz and the frequency inverter 15-50 Hz for multilevel inverters. The expediency of application for some types of converters filter-kompensiruyushego devices for different areas of regulation. Summarized the parameters of the sine filters for different types of variable frequency drives EGPA voltage 6 (10) kV.

Keywords: gas compressor unit, variable frequency drive, high voltage frequency Converter, AC motor, autonomous voltage inverter, the harmonic composition of voltage and current.

Введение. Турбокомпрессорные установки сегодня является основной всех газоперекачивающих агрегатов магистральных газопроводов [1–5]. От энергетических характеристик центробежных нагнетателей и их приводов во многом зависят энергоэффективность, надежность и экологичность в целом газотранспортных систем РФ [6–10]. С этих системных позиций наиболее перспективными в новых экономических условиях являются электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА), потенциал энергосбережения и функциональные возможности которых далеко не исчерпаны [11–15]. В соответствии с руководящими документами ПАО «Газпром» концепцией развития ЭГПА наметилась устойчивая тенденция перехода на использование частотно-регулируемых электроприводов ЭГПА на базе высоковольтных преобразователей частоты, выпускаемых, в частности, по импортозамещению и рядом отечественных предприятий [16–19].

Основные характеристики высоковольтных преобразователей частоты. Одним из основных энергетических показателей, характеризующих технический уровень высоковольтных преобразователей

частоты (ВВ ПЧ), является степень искажения формы выходного напряжения и тока ПЧ в ЭГПА [20–23].

Являясь нелинейной нагрузкой для питающей сети, ПЧ искажают форму тока в линиях питания и в результате вызывают искажение напряжения в питающей сети, что неблагоприятно отражается на работе другого электрооборудования, питающегося от данной сети [24–27].

Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) мощных полупроводниковых ПЧ с примыкающими сетями электроснабжения связана с двумя факторами: потреблением реактивной мощности на основной частоте и искажениями формы тока в питающей сети.

Ограничение потребления реактивной мощности до нормативных значений $\cos\varphi$ обычно обеспечивается в ПЧ с автономным инвертором напряжения (АИН) использованием неуправляемого выпрямителя (НВ). Реактивная мощность по первой гармонике при этом невелика. При использовании активных (управляемых) выпрямителей (АВ), что характерно для ПЧ с автономным инвертором тока (АИТ), применяют АВ или дополнительные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

При выпрямлении тока трехфазным мостовым полупроводниковым преобразователем, нагруженным на емкостную нагрузку фильтра, возникает искажение (несинусоидальность) формы тока в сети, питающей выпрямитель. Высшие гармоники тока вызывают падение напряжения в элементах питающей сети, что ведет к искажению напряжения в сети с ПЧ.

Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения установлены ГОСТ 13109-97, который определяет коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения как полный коэффициент гармоник (THD).

Нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с номинальным напряжением 6–20 кВ не должно превышать 5 и 8 % соответственно.

Обычно при измерении и разложении в ряд периодической кривой напряжения ограничиваются учетом гармоник, включая 40-ю, $n \leq 40$. Это связано с возможностями измерительных приборов. Нормально допустимые значения коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$ 6–20 кВ приведены

в табл. 1. При этом предельно допустимые значения гармоник принимают в 1,5 раза большими.

Для оценки влияния ПЧ на сеть недостаточно знать коэффициенты искажения ($k_{и}$). Большое значение здесь имеет величина мощности короткого замыкания, приведенная к напряжению шин в точке подключения ПЧ. Для мощных сетей с большими токами короткого замыкания искажение формы тока может отражаться незначительно.

Таблица 1

Допустимые значения коэффициента гармонической составляющей напряжения, %

Нечетные гармоники, не кратные 3		Нечетные гармоники, кратные 3		Четные гармоники	
n	%	n	%	n	%
5	4	3	1,5	2	1,5
7	3	9	0,5	4	0,7
11	2	15	0,3	6	0,3
13	2	21	0,2	8	0,3
17	1,5	>21	0,2	10	0,3
19	1			12	0,2
23	1			>12	0,2
25	1				
>25	$0,2+0,8 \cdot 25/n$				

Для слабых сетей электроснабжения с токами короткого замыкания $I_{кз} < 12$ кА выполнение условия допустимого значения $k_{и}$ является проблематичным. В этих случаях неизбежна установка индивидуальных ФКУ, что приводит к существенным дополнительным затратам. Положительный результат может быть также получен увеличением пульсности входного НВ с применением многообмоточного входного трансформатора. Радикальное решение этой проблемы достигается использованием АВ на полностью управляемых полупроводниковых ключах.

Решение вопросов ЭМС ВВ ПЧ с питающей сетью во многом зависит от общей системы электроснабжения и ее параметров и выходит за рамки данной статьи. Значительные трудности возникают при обеспечении ЭМС ПЧ с приводным электродвигателем переменного тока. Поскольку выходное напряжение ПЧ с АИН состоит из отдельных отрезков прямоугольной формы, то искажение формы выходного напряжения (а, следовательно, и выходного тока) будет весьма велико. Ана-

логичная картина будет и в АИТ. Это обстоятельство радикальным образом отражается на топологии и составе оборудования ВВ ПЧ. Для решения проблемы используются два основных технических решения: применение многоуровневых инверторов и установка выходных синусных фильтров.

Искажение синусоидальной формы выходных напряжения и тока самым неблагоприятным образом влияют на работу ВВ асинхронных (АД) и синхронных двигателей (СД), вызывая дополнительно нагрев и вибрации двигателя, сокращая срок службы его изоляции и создавая так называемую проблему длинного кабеля.

Форма напряжения АИН с ШИМ представляет собой последовательность ВВ прямоугольных импульсов различной полярности и длительности (в многоуровневых АИН разной амплитуды), характеризующихся высокой крутизной фронта импульсов dU/dt . Последняя определяется также скоростью (временем) переключения силовых ключей АИН. Это время для IGBT и IGCT составляет порядка 0,05–2,0 мкс. Волна импульсного напряжения воздействует на изоляцию обмоток статора, вызывает ее старение, что приводит к постепенному уменьшению электрической прочности межвитковой изоляции.

Другой не менее серьезной проблемой является перенапряжение на обмотках статора двигателя, которое зависит от длины кабеля между ПЧ и двигателем. В кабеле возникают при приложении импульсов напряжения волновые процессы, в результате которых амплитуда напряжения на конце кабеля может достигать двухкратного значения.

Компенсация этих отрицательных явлений может быть достигнута установкой на выходе ПЧ синусных фильтров или уменьшением амплитуды импульсов напряжения в случае использования многоуровневых АИН.

Наличие высокочастотных (ВЧ) составляющих в выходном токе ПЧ приводит к дополнительному нагреву магнитопровода двигателя переменного тока, появлению высших гармоник в магнитодвижущей силе (МДС) статора, увеличивающих шум и вибрации двигателя. Совершенно недопустима работа АД и СД с массивным ротором (так называемых турбодвигателей) от ПЧ с высоким коэффициентом несинусоидальности выходного тока. Дополнительный нагрев бочки ротора от (МДС) высших гармоник приводит к выходу двигателя из строя или к необходимости существенного (на 30–40 %) снижения нагрузки двигателя.

Эксплуатирующиеся в настоящее время ВВ АД и СД не были предназначены для работы от ПЧ, выходные ток и напряжение которых содержат высшие гармоники, приводящие к дополнительному нагреву АД, ухудшению изоляции и другим неблагоприятным факторам.

Исходя из изложенного, неременным требованием к ВВ ПЧ различных видов топологий является обеспечение качества выходной электроэнергии по величине несинусоидальности требованиям стандарта, т.е. величина THD по току и напряжению не должна превышать 5–8 % во всех режимах работы ПЧ. Это достигается установкой в необходимых случаях фильтров с соответствующими параметрами.

Для этого необходимо проведение сравнительного анализа гармонического состава выходных напряжений и токов ВВ ПЧ при различной топологии их построения [28–31], включая определение гармонического состава выходных токов и напряжений и определение THD напряжения и тока и нахождение параметров синусных фильтров, которые позволяют снизить THD до допустимых значений.

Описание имитационных моделей высоковольтных преобразователей частоты:

1. Имитационная модель двухуровневого АИН на IGBT в среде MatLab-Simulink представлена на рис. 1. Модель является базовой и состоит из источника постоянного напряжения, который моделируется идеальным, не имеющим внутреннего сопротивления.

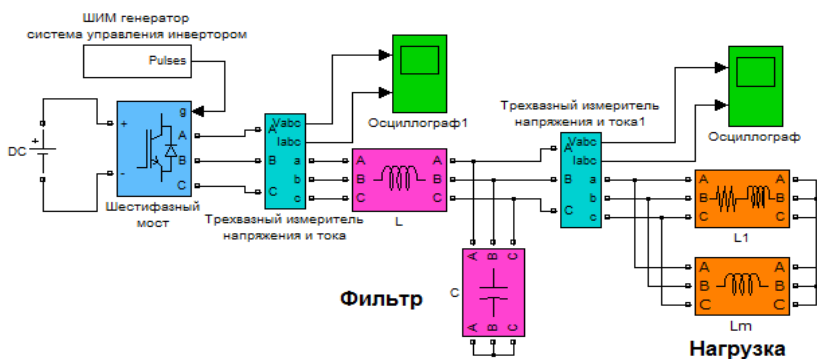


Рис. 1. Имитационная модель двухуровневого АИН с ШИМ

Двухуровневый ПЧ представляет собой АИН, собранный по трехфазной мостовой схеме с ключами IGBT, встречно-параллельно транзисторам включены диоды, предназначенные для пропуска индуктивных токов при активно-индуктивной нагрузке в момент коммутации.

При скалярном принципе регулирования выходных параметров ПЧ [32–35], что характерно для рассматриваемых электроприводов большой мощности, работающих в продолжительном режиме, используется традиционный закон управления: $U/f = \text{const}$. Это соотношение (формула М.П. Костенко) применяется для механизмов с вентиляторным характером нагрузки, включая все компрессоры, когда нет необходимости при снижении скорости стабилизировать момент.

Исходя из схемы замещения ВВ машины [36–39], можно положить $r_1 = 0$. Тогда при изменении напряжения по принятому закону управления ток намагничивания I_μ и, следовательно, поток статора Φ_1 остаются постоянными при регулировании скорости двигателя. При таком способе скалярного регулирования ВВ двигателей их максимальный момент в диапазоне скоростей 10:1 остается практически неизменным.

При моделировании используются следующие значения индексов ШИМ: при частоте инвертора 50 Гц индекс модуляции равен 1; при частоте инвертора 30 Гц равен 0,6; при частоте 15 Гц индекс модуляции равен 0,3. Напряжение инвертора при этом меняется в соответствии с известным выражением: $U_{ab} = m_a \sqrt{3} \frac{U_d}{2}$, а напряжение источника постоянного напряжения принимается при питании от сети 6 кВ $U_d = 9798$ В.

Трехфазные измерители напряжения и тока предназначены для представления результатов моделирования в виде, удобном для отображения их на осциллографах. Нагрузкой инвертора является высоковольтный асинхронный двигатель, в модели он представляется своей Г-образной схемой замещения. Между инвертором напряжения и нагрузкой установлен Г-образный электрический фильтр, предназначенный для сглаживания выходного напряжения инвертора до заданного уровня коэффициента гармоник.

2. Имитационная модель ПЧ по двухтрансформаторной схеме с низковольтным АИН в среде MatLab-Simulink отличается от представленной на рис. 1 тем, что в нее добавлен блок трансформатора, а напряжение источника постоянного напряжения принимается равным $U_d = 1126$ В. В этой связи между АИН и АД устанавливается повышающий трансформатор для согласования инвертируемого напряжения с номинальным напряжением ВВ машины.

3. Имитационная модель ПЧ с трехуровневым АИН на IGBT или IGCT в среде MatLab-Simulink состоит из двух источников постоянного напряжения с общей точкой, которые моделируются как идеальные источники напряжения без внутреннего сопротивления. Поэтому она отличается от модели на рис. 1 наличием блока трехуровневого моста. Амплитуда напряжения АИН формируется двумя последовательно включенными инверторами напряжения при напряжении каждого $U_d = 4899$ В.

4. Имитационная модель ПЧ с многообмоточным трансформатором и каскадным соединением инверторных модулей (для одиннадцатиуровневого инвертора напряжения) в среде MatLab-Simulink представлена на рис. 2. Инвертор состоит из пятнадцати ячеек однофазных двухуровневых инверторов, соединенных в звезду по пять ячеек последовательно в луче. Одиннадцать уровней линейного напряжения достигаются последовательным соединением пяти источников напряжения в каждой фазе плюс нулевое значение. Напряжение каждого из источников принимается $U_d = 979,8$ В. Остальные элементы модели, фильтр, нагрузка, измерительные элементы аналогичны предыдущим моделям.

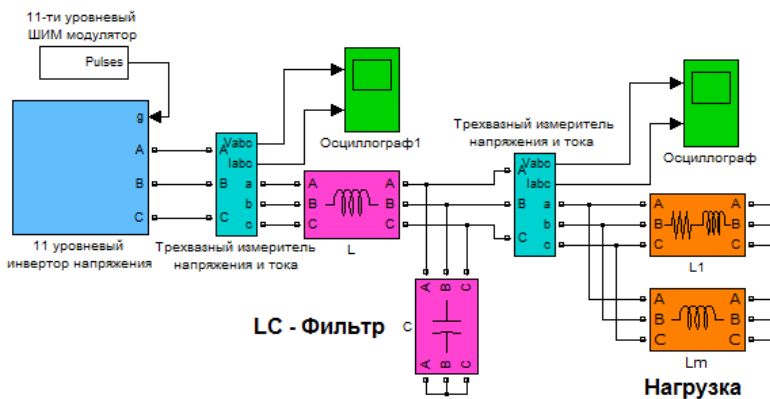


Рис. 2. Имитационная модель одиннадцатиуровневого инвертора

5. Имитационная модель с ШИМ-выпрямителем и ШИМ АИТ на SGCT в среде MatLab-Simulink представлена на рис. 3. Модель состоит из идеального источника тока, инвертора тока и нагрузки, состоящей из активного и индуктивных сопротивлений Г-образной схемы замещения двигателя. Ключи инвертора тока моделируются идеальными, без временной задержкой при отключении. Система управления АИТ предусматривает управление ключами таким образом, чтобы не допустить разрыва цепи постоянного тока в момент коммутации ключей.

Поскольку бросок напряжения многократно превышает рабочее напряжение двигателя, необходима установка специальных буферных конденсаторов для совместимости АИТ с индуктивной нагрузкой. Кроме того, параллельно нагрузке включался С-фильтр.

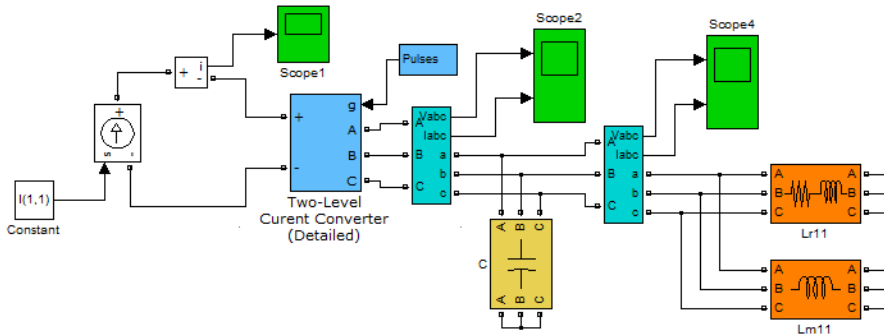


Рис. 3. Модель ПЧ с ШИМ-выпрямителем и ШИМ-инвертором тока на SGCT

Результаты исследования гармонического состава выходного напряжения и тока высоковольтных преобразователей частоты. Варьируя значения частоты ШИМ и частоты инвертора, проведены измерения линейного напряжения между фазами *A* и *B* и тока фазы *A*, а также спектрального анализа напряжения и тока на выходе инвертора вплоть до гармоник, соответствующих частоте ШИМ. Всего было снято более 600 осциллограмм. Приведем наиболее характерные:

1. Результаты моделирования ПЧ с двухуровневым инвертором напряжения на IGBT.

Таблица 2

Значения THD двухуровневого инвертора напряжения при полном учете гармоник

Частота ШИМ: 1000 Гц									
<i>P</i> ад, кВт	800			1250			3150		
<i>f</i> _{инв} , Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
THD U, %	68,58	120,5	197,5	68,58	119,7	197,3	68,58	120,3	197,8
THD I, %	9,7	15,23	9,7	8,6	13,74	9,06	9,74	15,3	9,656
Частота ШИМ: 1500 Гц									
<i>P</i> ад, кВт	800			1250			3150		
<i>f</i> _{инв} , Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
THD U, %	68,58	120,4	197,4	68,61	120,5	197,4	68,62	120,5	197,4
THD I, %	6,5	10,47	7,15	5,75	9,385	6,573	6,55	10,5	7,143

Частота ШИМ: 2500 Гц									
$P_{ад}$, кВт	800			1250			3150		
$f_{инв}$, Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
THD U, %	68,67	120,5	197,8	68,67	120,5	197,8	68,68	120,5	197,8
THD I, %	3,92	6,39	4,59	3,46	5,712	4,16	3,948	6,418	4,592

Зависимости THDU и THDI двухуровневого инвертора напряжения для различных значений частот инвертора и частот ШИМ для двигателей различной мощности (полный спектр гармоник) даны на рис. 4, а характерные осциллограммы – на рис. 5.

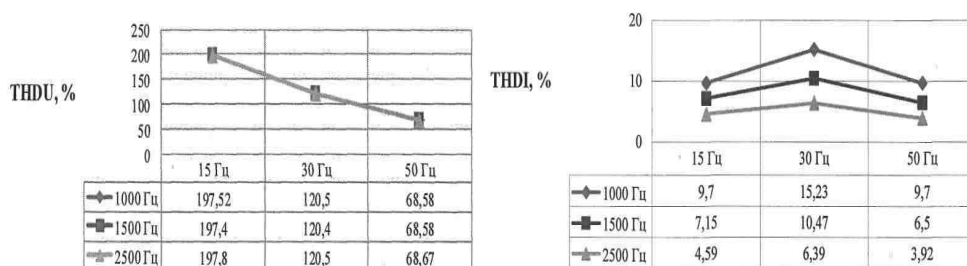


Рис. 4. Зависимости коэффициента гармоник напряжения и тока от частоты инвертора при разных частотах ШИМ ($P_{ад} = 800, 1250, 3150$ кВт)

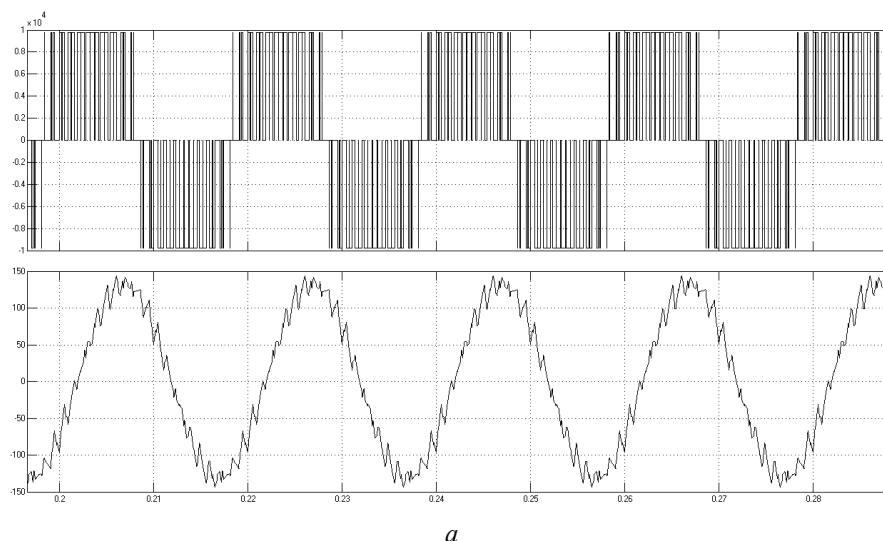
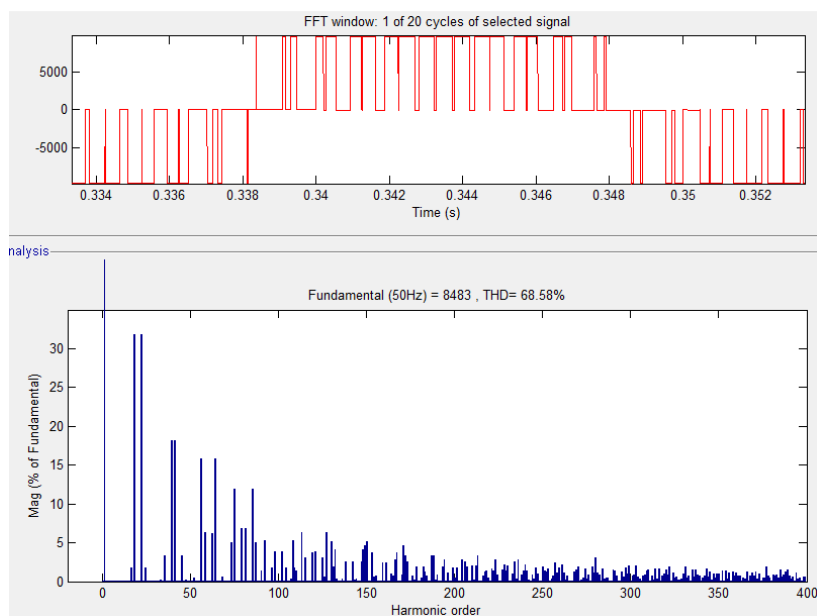


Рис. 5. Двухуровневый инвертор напряжения без фильтра (характерные осциллограммы при частоте ШИМ 1000 Гц и частоте инвертора 50 Гц):

а – напряжение и ток нагрузки; б – напряжение нагрузки и спектр гармоник напряжения



б

Рис. 5. Окончание

Исследование гармонического состава выходного напряжения двухуровневого инвертора проведено также на частоте модуляции 2500 Гц. Если сравнить полученные результаты с данными табл. 2, то можно констатировать, что при пропорциональном регулировании частоты и напряжения по мере снижения выходной частоты гармонический состав напряжения существенно ухудшается.

Зависимость ТНДУ напряжения (учитываемые гармоники $n \leq 40$) двухуровневого АИН для различных значений частот инвертора и частот ШИМ приведена в табл. 3.

Таблица 3

Значения ТНД (учитываемые гармоники $n \leq 40$), полученные в результате моделирования двухуровневого инвертора напряжения

F ШИМ, Гц	1000			1500			2500		
$f_{инв}$, Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
ТНД U, %	48,57	31	3,2	45,03	0,6	0,8	0,72	1,23	1,5

Результаты анализа моделирования гармонического состава ПЧ с двухуровневым АИН:

- Гармонический состав двухуровневого инвертора напряжения без выходного фильтра крайне неблагоприятен. THDU достигает 200 % при учете полного состава гармоник. Использование данных ПЧ без мощного выходного фильтра невозможно. Коэффициент гармоник тока также велик и достигает 15 % при частоте ШИМ 1000 Гц, снижаясь до величины 6,4 % при частоте ШИМ 2500 Гц.

- При уменьшении выходной частоты с одновременным пропорциональным снижением напряжения изменяется индекс модуляции, при этом ухудшается гармонический состав. Если используется более глубокое снижение частоты (например, по формуле М.П. Костенко), то THDU увеличивается по мере снижения частоты еще более значительно, примерно в 1,5 раза.

- Увеличение частоты ШИМ не отражается на величине THDU, которая остается чрезмерно высокой даже при частоте ШИМ 2500 Гц при учете полного состава гармоник. Увеличение частоты ШИМ до 2500 Гц уменьшает коэффициент THDU почти в 100 раз, поскольку гармоники, вызванные ШИМ модуляцией, имеют порядок $n = 50$, т.е. не измеряются прибором и не учитываются при оценке. Однако эти гармоники существуют, и желательна их фильтрация. Коэффициент несинусоидальности тока THDI по мере увеличения частоты ШИМ уменьшается и мало зависит от выходной частоты инвертора.

- Гармонический состав напряжения на выходе ПЧ практически не зависит от мощности двигателя 6,0 кВт в рассмотренном диапазоне мощностей (от 800 до 3200 кВт). Гармонический состав тока THDI мало зависит от мощности двигателя. Этот вывод относится ко всем вариантам преобразователей частоты и в дальнейшем изложении не повторяется.

- Применение синусного фильтра на выходе преобразователя при достаточной его мощности позволяет снизить состав гармоник напряжения и тока: THDU – до 4 %, тока – до 0,5 %, т.е. до допустимых значений. Величина необходимой емкости фильтра существенно уменьшается при увеличении частоты ШИМ, однако при увеличении частоты ШИМ существенно увеличиваются потери на коммутацию ключей.

2. Результаты моделирования ПЧ с трехуровневым АИН на IGBT или IGCT:

- Искажение кривой выходного напряжения для трехуровневого инвертора без выходных фильтров характеризуется существенно меньшими значениями THD при всех изменениях выходной частоты и частоты ШИМ по сравнению с двухуровневым инвертором.

- Характер зависимости ТНД от выходной частоты ШИМ, по существу, аналогичен таким же зависимостям, как для двухуровневых инверторов.

- Величина ТНД напряжения и тока мало зависит от мощности двигателя.

- Применение Г-образного синусного фильтра при частоте ШИМ 1000 Гц позволяет получить допустимые значения ТНД напряжения и тока при изменении выходной частоты во всем диапазоне.

- При частоте ШИМ 1500 Гц и выше требуемая величина ёмкости фильтра существенно уменьшается по сравнению с двухуровневым инвертором.

3. Результаты моделирования ПЧ с многообмоточным трансформатором и каскадным соединением пяти инверторных модулей (одиннадцатипульсовый инвертор напряжения):

- Для ПЧ с многоуровневым каскадным АИН первые всплески гармоник появляются, начиная с частот, лежащих много выше частот ШИМ-модуляции, поэтому если принимать во внимание гармоники до 40, то применения выходных фильтров не требуется, если нет специальных требований к ограничению высокочастотных составляющих спектра гармоник.

- В одиннадцатипульсовом инверторе за счет сдвига по фазе напряжений отдельных модулей происходит взаимокompенсация высших гармоник, что ведет к существенному улучшению формы выходного напряжения и тока. С ростом выходной частоты инвертора от 15 до 50 Гц гармонический состав улучшается – ТНДУ уменьшается.

- Если рассматривать полный набор гармоник, в том числе выше 40-й, коэффициент гармоник по напряжению ТНДУ не зависит от частоты ШИМ – с ростом частоты ШИМ растет частота гармоник (их набор сдвигается в область ВЧ), а амплитуда сохраняется. В этом случае ТНДУ меньше 1 % (для $f_{\text{ШИМ}} = 1000$ Гц) и меньше 0,4 % при более высокой частоте ШИМ.

- Искажение формы тока на выходе одиннадцатипульсового АИН незначительно. Даже при учете полного набора гармоник ТНДИ не превышает 1 %. С увеличением частоты ШИМ наличие гармонических составляющих в выходном токе еще более уменьшается. Зависимость коэффициента гармоник тока от мощности двигателя практически не проявляется.

- Если учитывать только гармоники ниже 40-й, то синусный фильтр на выходе одиннадцативольного инвертора можно не устанавливать, так как THDU ниже допустимого, что подтверждается практикой ведущих фирм-производителей этого типа ПЧ.

4. Результаты моделирования ПЧ по двухтрансформаторной схеме с низковольтным инвертором напряжения:

- При отсутствии выходного фильтра коэффициент искажения напряжения очень большой, почти такой же, как и у ВВ двухуровневого ПЧ. Использование данной схемы без выходного фильтра невозможно.

- Ступенчатый характер формы выходного напряжения данного ПЧ связан с тем, что выходной повышающий трансформатор имеет схему соединения обмоток «треугольник–звезда».

- Применение низковольтного LC-фильтра на выходе инвертора позволяет снизить коэффициент искажения напряжения и тока до допустимых значений, однако требуемая мощность фильтра весьма велика.

5. Результаты моделирования ПЧ с ШИМ-выпрямителем и ШИМ-инвертором тока на SGCT с ёмкостным фильтром:

- Для инвертора тока характерно большее искажение формы выходного напряжения, чем формы выходного тока. В ПЧ этого типа необходимо использование емкостных фильтров на выходе преобразователя.

- Инверторы с ШИМ тока имеют ограниченный диапазон частоты ШИМ.

- Применение выходного емкостного фильтра с реактивной мощностью 125 % от реактивной мощности двигателя позволяет получить нормальные значения THD тока и напряжения даже при частоте ШИМ 500 Гц.

- Увеличение степени компенсации реактивной мощности двигателя улучшает гармонический состав выходного тока и напряжения.

Выводы

1. Комплексный анализ моделирования гармонического состава выходного напряжения и тока высоковольтных преобразователей частоты различной топологии как без выходного фильтра, так и с синусным выходным фильтром показал, что наихудшие значения коэффициента искажения имеют двухуровневые АИН.

2. Коэффициент искажения напряжения для трехуровневых инверторов также имеет значения THDU, превосходящие допустимые.

Однако требуемая мощность выходных фильтров будет при этом примерно на 40 % меньше, чем для двухуровневых инверторов. Многоуровневые инверторы напряжения с многообмоточным трансформатором имеют формы выходного напряжения и тока, близкие к синусоидальной, но для подавления гармоник высоких порядков рекомендуется устанавливать «слабые» фильтры.

3. Для инверторов тока с ШИМ-модуляцией тока установка С-фильтров необходима, исходя из принципов работы инверторов тока. При установке выходных конденсаторных фильтров соответствующей реактивной мощности коэффициент искажения по напряжению и току не будет превышать допустимых значений. Требуемая мощность конденсаторов составляет 1,25–1,75 от номинальной величины реактивной мощности приводного двигателя.

Библиографический список

1. Милов В.Р., Суслов Б.А., Крюков О.В. Интеллектуализация поддержки управленческих решений в газовой отрасли // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 12. – С. 16–20.

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

3. Серебряков А.В., Крюков О.В. О новых возможностях технологий Smart Grid // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 2. – С. 47–48.

4. Бабичев С.А., Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматизированная система безопасности электроприводных ГПА // Электротехника. – 2010. – № 12. – С. 24–31.

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

6. Крюков О.В. Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 10. – С. 50–53.

7. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных

газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4(29). – С. 35–38.

8. Крюков О.В. Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы асинхронных электроприводов // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 6. – С. 43–46.

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

10. A Concept for the development of invariant automated electric drives for the water recycling systems with fan cooling towers / N.V. Kiyanov, O.V. Kryukov, D.N. Pribytkov, A.V. Gorbatushkov // Russian Electrical Engineering. – 2007. – Vol. 78. – № 11. – P. 621–627.

11. 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.

12. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Мониторинг технического состояния приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 7. – С. 33–39.

13. Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации ЭГПА // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3(19). – С. 209–212.

14. Kryukov O.V. Intelligent electric drives with IT algorithms // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74. – № 6. – P. 1043–1048.

15. Милов В.Р., Шалашов И.В., Крюков О.В. Процедуры прогнозирования и принятия решений системе технического обслуживания и ремонта // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 8. – С. 47–49.

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

17. Крюков О.В. Регулирование производительности ЭГПА // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 3. – С. 21–24.

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

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

20. Крюков О.В. Частотное регулирование производительности ЭГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 6. – С. 39–43.

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

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

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

24. Серебряков А.В., Крюков О.В. Оптимизация управления автономными энергетическими установками в условиях стохастических возмущений // Промышленная энергетика. – 2013. – № 5. – С. 45–49.

25. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15 / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М., 2015. – С. 368–386.

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

27. Захаров П.А., Крюков О.В. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях // Вестник Иванов. гос. энергетич. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 98–103.

28. Васенин А.Б., Крюков О.В., Титов В.В. Анализ технико-экономических параметров энергетических установок для объектов ОАО «Газпром» // Приводная техника. – 2011. – № 6. – С. 2–11.

29. 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. – № 1. – P. 175–180.

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

31. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б. Нечеткие модели и алгоритмы управления энергетическими установками // Управление в технических и сетевых системах: материалы конф. / под ред. С.Н. Васильева; Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М., 2012. – С. 467–469.

32. Крюков О.В. Интеллектуальные электроприводы с ИТ-алгоритмами // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 36–39.

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

34. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO '12): сб. тр.: IX МНТК / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М., 2012. – С. 222–236.

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

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

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

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

39. Крюков О.В., 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.

References

1. Milov V.R., Suslov B.A., Kriukov O.V. Intellektualizatsiia podderzhki upravlencheskikh reshenii v gazovoi otrasli [Intellectual support of the management decision in gas industry]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2009, no. 12, pp. 16-20.

2. Anikin D.A., Rubtsova I.E., Kriukov O.V., Kiianov N.V. Proektirovanie sistem upravleniia elektroprivodnymi gazoperekachivaiushchimi agregatami [Designing the control systems of the electric gas pumping units]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2009, no. 2, pp. 44-47.

3. Serebriakov A.V., Kriukov O.V. O novykh vozmozhnostiakh tekhnologii Smart Grid [Advance features of the Smart Grid technology]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont*, 2013, no. 2, pp. 47-48.

4. Babichev S.A., Kriukov O.V., Titov V.G. Avtomatizirovannaia sistema bezopasnosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Automatic safety instrumented system of electric pumping units]. *Elektrotehnika*, 2010, no. 12, pp. 24-31.

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

6. Kriukov O.V. Analiz i tekhnicheskaiia realizatsiia faktorov energoeffektivnosti innovatsionnykh reshenii v elektroprivodnykh turbokompressorakh [Analysis and engineering implementation of innovation decisions in electric turbine driven compressors power efficiency]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2010, no. 10, pp. 50-53.

7. Kriukov O.V., Serebriakov A.V. Metod i sistema priniatiia reshenii po prognozirovaniuu tekhnicheskogo sostoianiia elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Method and decision making system in forecasting the technical position of electric gas pumping units]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2015, no. 4(29), pp. 35-38.

8. Kriukov O.V. Vstroennaia sistema diagnostirovaniia i prognozirovaniia raboty asinkhronnykh elektroprivodov [Build-in testing and forecasting system of running the asynchronous electric drives]. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika*, 2005, no. 6, pp. 43-46.

9. Kriukov O.V. Metodologiia i sredstva neuro-nechetkogo prognozirovaniia sostoianiia elektroprivodov gazoperekachivaiushchikh agregatov

[Methodology and means of neuron-distinct forecasting of the electric drive gas pumping units state]. *Elektrotehnika*, 2012, no. 9, pp. 52-60.

10. Kiyanov N.V., O.V. Kryukov, D.N. Pribytkov, A.V. Gorbatushkov. 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.

11. Kriukov O.V., Stepanov S.E. Povyshenie ustoichivosti raboty elektroprivodov tsentrobezhnykh nagnetatelei na kompressornykh stantsiiakh OAO «Gazprom» [Increasing the stability improvement of the centrifugal blowers electric drives operation in the compressor stations by "Gazprom"]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 8(710), pp. 50-56.

12. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kriukov O.V. Monitoring tekhnicheskogo sostoianiia privodnykh elektrodvigateli gazoperekachivaiushchikh agregatov [Technical conditions monitoring of the gas pumping unit electric drive motor]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2009, no. 7, pp. 33-39.

13. Kriukov O.V., Stepanov S.E. Puti modernizatsii elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Ways of the electric drive gas pumping unit improvement]. *Elektromekhanichni i energozberigaiuchi sistemi*, 2012, no. 3(19), pp. 209-212.

14. Kryukov O.V. Intelligent electric drives with IT algorithms. *Automation and Remote Control*, 2013, vol. 74, no. 6, pp. 1043-1048.

15. Milov V.R., Shalashov I.V., Kriukov O.V. Protsedury prognozirovaniia i priniatiia reshenii sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniia i remonta [Forecasting procedure and decision making of the maintenance and repair system]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2010, no. 8, pp. 47-49.

16. Kriukov O.V., Krasnov D.V. Perspektivy primeneniia preobrazovatelei chastoty dlia regulirovaniia proizvoditel'nosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Application prospects of the frequency converter for the electric gas pumping units output control]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 6(707), pp. 86-89.

17. Kriukov O.V. Regulirovanie proizvoditel'nosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Frequency converter of the electric drive gas pumping units]. *Kompressornaia tekhnika i pnevmatika*, 2013, no. 3, pp. 21-24.

18. Kriukov O.V. Opyt sozdaniia energoeffektivnykh elektroprivodov gazoperekachivaiushchikh agregatov [Creation experience of energy-efficient electric motors for gas-compressor units]. *Trudy VIII Mezhd-*

narodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014. Saransk, 2014, vol. 2, pp. 157-163.

19. Kriukov O.V., Titov V.V. Razrabotka ASU avtonomnymi energeticheskimi ustanovkami [Development of the automated control systems for the independent power plants]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2009, no. 4, pp. 35-37.

20. Kriukov O.V. Chastotnoe regulirovanie proizvoditel'nosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Performance frequency regulation of the electric gas pumping units]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont*, 2014, no. 6, pp. 39-43.

21. Kriukov O.V., Vasenin A.B., Serebriakov A.V. Eksperimental'nyi stend elektromekhanicheskoi chasti energeticheskoi ustanovki [Test bench of the electric power installation electro-mechanical part]. *Privodnaia tekhnika*, 2012, no. 4, pp. 2-11.

22. Kriukov O.V., Stepanov S.E., Bychkov E.V. Invariantnye sistemy tekhnologicheskii sviazannykh elektroprivodov ob"ektov magistral'nykh gazoprovodov [Invariant systems of technically connected gas pipeline objects electric drives]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014*. Saransk, 2014, vol. 2, pp. 409-414.

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

24. Serebriakov A.V., Kriukov O.V. Optimizatsiia upravleniia avtonomnymi energeticheskimi ustanovkami v usloviakh stokhasticheskikh vozmushchenii [Control optimization of the stand-alone power plants in stochastic perturbation conditions]. *Promyshlennaia energetika*, 2013, no. 5, pp. 45-49.

25. Kriukov O.V. Strategii invariantnykh sistem upravleniia elektropriivodami ob"ektov OAO «Gazprom» [Strategy of non-variant control system by electric drives for "Gazprom" objects]. *Trudy X Mezhdunarodnoi konferentsii "Identifikatsiia sistem i zadachi upravleniia (SICPRO'15)"*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova Rossiiskoi akademii nauk, 2015, pp. 368-386.

26. Zakharov P.A., Kriukov O.V. Metodologiiia invariantnogo upravleniia agregatami KS pri sluchainykh vozdeistviiakh [Methodology of non-variant pump station units control while random functions]. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika*, 2009, no. 5, pp. 64-70.

27. Zakharov P.A., Kriukov O.V. Printsipy invariantnogo upravleniia elektroprivodami gazotransportnykh sistem pri sluchainykh vozmushcheniiakh [Aspects of the unambiguous control by gas pipeline system electric drives while random perturbation]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2008, no. 2, pp. 98-103.

28. Vasenin A.B., Kriukov O.V., Titov V.V. Analiz tekhniko-ekonomicheskikh parametrov energeticheskikh ustanovok dlia ob"ektov OAO «Gazprom» [Analysis of power plants performance parameters for "Gazprom" objects]. *Privodnaia tekhnika*, 2011, no. 6, pp. 2-11.

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

30. Puzhailo A.F., Kriukov O.V., Rubtsova I.E. Energoberezhenie v agregatakh kompressornykh stantsii sredstvami chastotno-reguliruemogo elektroprivoda [Compressor plants power saving by means of variable frequency electric drive]. *Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti*, 2012, no. 2(50), pp. 98-106.

31. 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 Rossiiskoi akademii nauk, 2012, pp. 467-469.

32. Kriukov O.V. Intellektual'nye elektroprivody s IT-algoritmami [Intellectual electric drives with IT-algorithms]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2008, no. 6, pp. 36-39.

33. Kriukov O.V., Serebriakov A.V., Vasenin A.B. Diagnostika elektromekhanicheskoi chasti energeticheskikh ustanovok [Troubleshooting of the power station electro-mechanical part]. *Elektromekhanichni i energozberigaiuchi sistemi*, 2012, no. 3(19), pp. 549-552.

34. 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 Rossiiskoi akademii nauk, 2012, pp. 222-236.

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

36. Stepanov S.E., Kriukov O.V., Plekhov A.S. Printsipy avtomaticheskogo upravleniia vozbuзhdeniem sinkhronnykh mashin gazokompressornykh stantsii [Factors of the automatic excitation control of the gas compressor station synchronous machines]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2010, no. 6, pp. 29-31.

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

38. 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.

39. Kriukov O.V., Stepanov S.E., Titov V.G. Vstroennye sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoianiia elektroprivodov dlia energeticheskoi bezopasnosti transporta gaza [Built-in monitoring systems of electric drives technical position for gas transfer power security]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, 2012, no. 2, pp. 5-10.

Сведения об авторе

Степанов Сергей Евгеньевич (Нижний Новгород, Россия) – кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Гипрогазцентр» (603950, Н. Новгород, ГСП-926, ул. Алексеевская, 26, e-mail: Stepanov55@yandex.ru).

About the author

Stepanov Sergey Evgenievich (Nizhny Novgorod, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Leading Engineer of JSC «Giprogazcenter» (603950, Nizhny Novgorod, 26, Alekseevskaya str., GSP-926, e-mail: Stepanov55@yandex.ru).

Получено 28.04.2017