

УДК 621.314.58

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРОВ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА С ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Бочкарева И.И.

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина», Саратов, Россия, e-mail: epp@sstu.ru

На компрессорных станциях магистрального транспорта газа с газотурбинным приводом нагнетателей наиболее энергоемкими объектами являются установки охлаждения газа. Эффективным средством уменьшения расхода электроэнергии на работу этих установок является применение частотного регулирования производительности вентиляторов в зависимости от технологических параметров транспорта газа и климатических условий. Опыт создания и внедрения установок охлаждения газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов показал необходимость решения задач по обеспечению электромагнитной совместимости электроприводов с источниками электроснабжения. При определенном количестве одновременно работающих установок охлаждения газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов происходит существенное искажение формы кривой напряжения в сети. Проблема усугубляется при переводе компрессорной станции на электроснабжение от автономных источников. Исследованию вопросов качества электроэнергии в системе электроснабжения газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов посвящена настоящая статья. Предлагаются пути решения задачи по обеспечению электромагнитной совместимости частотно-регулируемых электроприводов с источниками электроснабжения. Приведенные в статье результаты получены с помощью математического моделирования в среде MATLAB+Simulink.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, высшие гармоники, преобразователи частоты, установки охлаждения газа.

ASSURANCE OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF FREQUENCY-REGULATED ELECTRO DRIVE OF FANS OF GAS COOLERS WITH POWER SUPPLY SOURCES

Bochkareva I.I.

Saratov State Technical University named Gagarin Y.A., Russian Federation, Saratov, e-mail: epp@sstu.ru

The most powerful equipment at the compressor stations of magistral gas transport with gas-turbine drive of blowers is a gas coolers. The application of frequency regulation of fan delivery depends on technological parameters and climatic conditions is a very effective tool for decrease of raw materials consumption. Experience of creation and implementation of gas cooler with the frequency-regulated electro drive of fans shows a necessity of measures to the assurance of electromagnetic compatibility of the frequency-regulated electro drives with a power supply sources. On certain quantity of concurrently running gas coolers with frequency-regulated electro drive of fans the significant distortion of voltage curve form occurs in grid. The problem becomes more serious in case of autonomous power supply sources. This article dedicated to investigation of power quality in the power supply systems of gas-turbine stations in equipment by the frequency-regulated electro drive of fans of gas coolers. The ways of problem solving of assurance of electromagnetic compatibility of the frequency-regulated electro drives with a power supply sources introduced in this paper. Described results reached by mathematical modeling MATLAB+Simulink.

Key words: electromagnetic compatibility, power quality, high harmonics, frequency converters, gas coolers.

На компрессорных станциях (КС) магистрального транспорта газа с газотурбинным приводом нагнетателей наиболее энергоемкими объектами являются установки охлаждения газа (УОГ) [1]. Эффективным средством уменьшения расхода электроэнергии на работу этих установок является применение частотного регулирования производительности вентиляторов в зависимости от технологических параметров транспорта газа и климатических условий [2]. Однако опыт создания и внедрения установок охлаждения газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов показал необходимость решения задач по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) электроприводов с источниками электроснабжения [3]. При определенном количестве одновременно работающих УОГ с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов происходит существенное искажение формы кривой напряжения в сети. Проблема усугубляется при переводе компрессорной станции на электроснабжение от автономных источников, в качестве которых, главным образом, применяются газотурбинные электростанции. При этом доля электроэнергии, выработанной газотурбинными электростанциями на объектах магистрального транспорта газа, постоянно возрастает.

В состав УОГ входит от 24 до 32 электродвигателей мощностью 37 кВт каждый, поэтому суммарная мощность, потребляемая установкой от источников электроснабжения, может превышать 1 МВт. В соответствии с требованиями нормативных документов [6] по категории электроснабжения УОГ схема управления электродвигателями должна быть реализована в виде двух симметричных секций, каждая из которых подключается к вторичной обмотке соответствующего понизительного трансформатора 6(10)/0,4 кВ комплектно-трансформаторной подстанции (КТП). При этом обе секции должны иметь возможность получать электроэнергию от одного из трансформаторов КТП. Обязательным условием функционирования УОГ должно быть обеспечение ЭМС электрооборудования этой установки с источниками электроснабжения и электрооборудованием других технологических комплексов КС.

На рис. 1 показана схема одной секции КТП для электроснабжения УОГ с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов. Преобразователи $ПЧ_1...ПЧ_N$ подключены к шине 0,4 кВ через сетевые дроссели $L_{C1}...L_{CN}$, первичные обмотки трансформатора 6(10)/0,4 кВ – к источнику электроснабжения. Электродвигатели $M_1...M_N$ соединены с выходами преобразователей $ПЧ_1...ПЧ_N$ через моторные дроссели $L_{M1}...L_{MN}$. Общее количество частотно-регулируемых электроприводов УОГ, получающих питание от КТП, составляет $2N$.

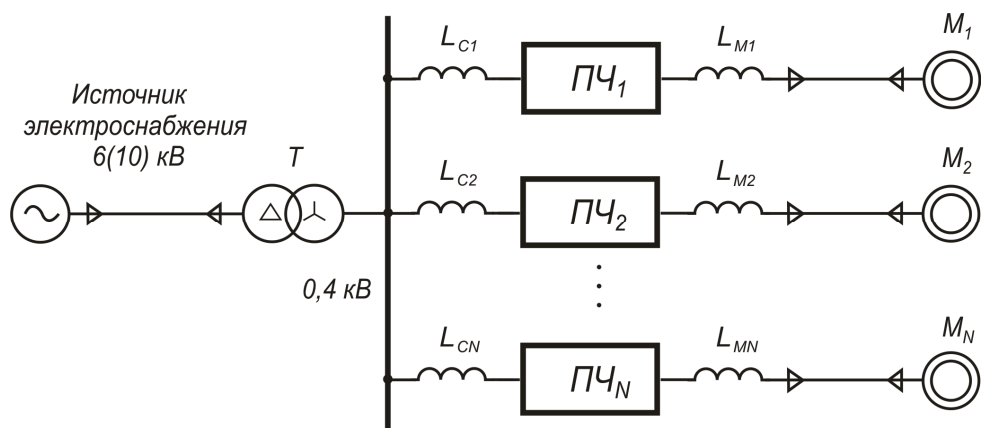


Рис. 1. Схема одной секции КТП для электроснабжения УОГ с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов.

Современные ПЧ для регулируемого электропривода строят, в основном, по схеме: неуправляемый выпрямитель – сглаживающий фильтр – инвертор напряжения на IGBT-модулях. Так как выпрямители выполняют по трехфазной мостовой схеме, то входной ток ПЧ представляет собой сумму нечетных гармоник, за исключением кратных трем. При этом наиболее интенсивными являются гармоники с номерами 5 и 7. В условиях, когда изготовители ПЧ применяют, в основном, конденсаторные сглаживающие фильтры, уровень высших гармоник в кривой входного тока ПЧ оказывается соизмеримым с уровнем основной гармоники [5]. Это приводит к появлению высших гармоник напряжения на всех уровнях системы электроснабжения газотурбинной КС.

На рис. 2 для примера показаны осциллограммы напряжения на шине 0,4 кВ и тока вторичной обмотки трансформатора КТП типа ТМЗ-630/10 при 12 работающих преобразователях Altivar 58 [3].

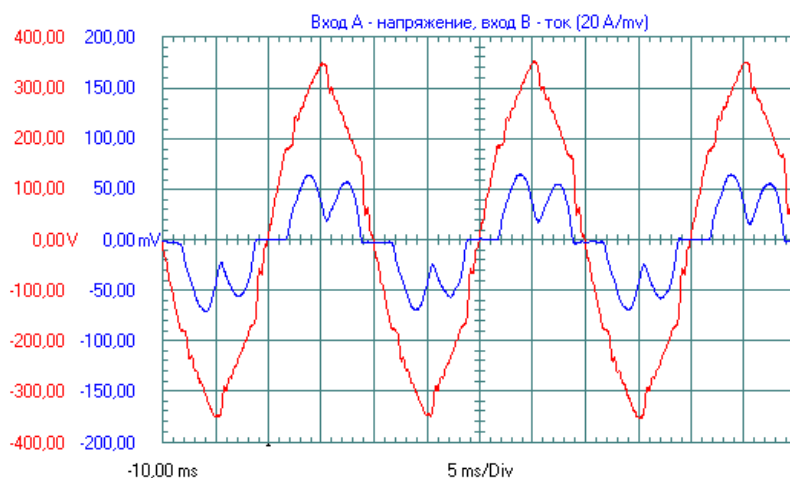


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока вторичной обмотки трансформатора при работе 12 преобразователей.

В кривой тока, потребляемого преобразователями от вторичной обмотки трансформатора, преобладает 5-я гармоника, ее коэффициент равен 37,4% при общей величине коэффициента искажения кривой тока 40,13%. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 6,36%.

Уменьшение искажающего влияния частотно-регулируемого электропривода вентиляторов УОГ на питающую сеть может быть достигнуто применением различного рода фильтров, простейшими из которых являются сетевые дроссели, устанавливаемые на входе ПЧ. Такое решение может быть достаточно эффективным, пока на компрессорной станции ПЧ установлены только на одной-двух УОГ. По мере роста количества УОГ, оснащенных частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов, установка сетевых дросселей не обеспечит заданного качества электрической энергии на стороне 6 или 10 кВ, определенного стандартом [4].

Эффективным решением задачи уменьшения искажающего влияния ПЧ на источники электроснабжения является применение так называемых активных фильтров [7]. Принцип действия этих устройств состоит в том, что на основе анализа тока нелинейной нагрузки в питающую сеть генерируются такие же гармоники тока, но в противоположной фазе. В результате этого в точке подключения активного фильтра происходит компенсация гармоник. На сегодняшний день активная фильтрация гармоник в питающей сети может оказаться экономически нецелесообразной из-за высоких стоимостных показателей оборудования.

С практической точки зрения может оказаться целесообразным следующее решение задачи обеспечения требуемого качества электроэнергии в питающей сети. Предлагается каждый трансформатор КТП выполнить с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединяется по схеме «звезда», другая – по схеме «треугольник». В результате происходит разделение каждой секции шин 0,4 кВ на две подсекции, к каждой из которых подключается половина частотно-регулируемых электроприводов секции (рис. 3). В частности, при общем количестве электроприводов УОГ, равном 24, к одной обмотке трансформатора будет подключено 6 электроприводов.

Так как напряжения вторичных обмоток трансформатора смещены по фазе относительно друг друга на угол, равный $\pi/6$, то при равенстве токов вторичных обмоток будет происходить компенсация 5-й и 7-й гармоник магнитного потока. В результате в токе первичной обмотки трансформатора указанные гармоники также будут скомпенсированы.

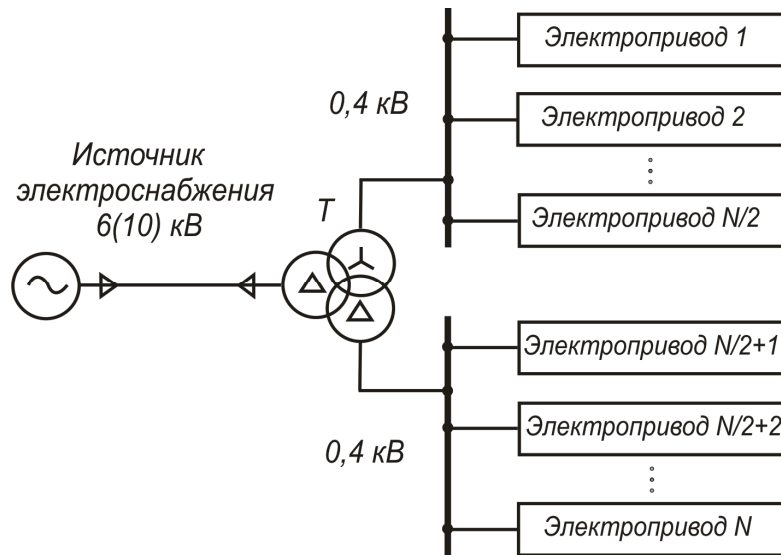


Рис. 3. Схема разделенной секции КТП для электроснабжения УОГ с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов.

Для исследования ЭМС частотно-регулируемого электропривода УОГ с источниками электроснабжения может быть применена расчетная схема, которая показана на рис. 4. На этой схеме: L_{Ck}, R_{Ck} — соответственно индуктивность и активное сопротивление сетевого дросселя, который может быть установлен на входе ПЧ для обеспечения норм ЭМС; $C_{Фk}, L_{dk}, R_{dk}$ — соответственно емкость, индуктивность и активное сопротивление сглаживающего дросселя на выходе выпрямителя; $R_{Иk}$ — эквивалентное входное сопротивление инвертора k-го ПЧ.

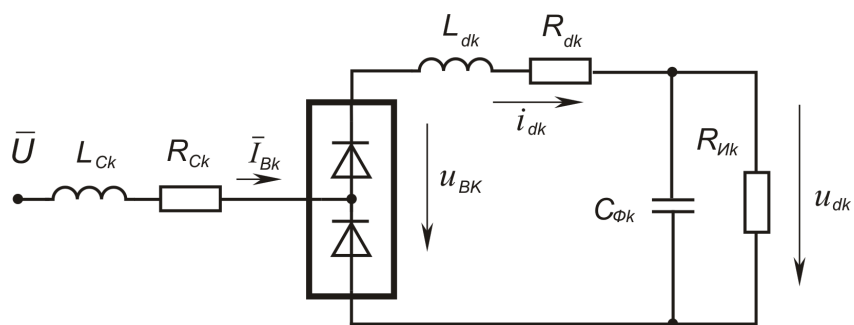


Рис. 4. Расчетная схема электропривода УОГ.

Инвертор, входящий в состав ПЧ для управления электродвигателем, в схеме на рис. 4 представлен входным сопротивлением $R_{Иk}$. Правомерность такого подхода обусловлена тем, что в рассматриваемом случае целью моделирования электротехнического комплекса

является анализ влияния канонических гармоник в спектре тока, потребляемого ПЧ, на качество электроэнергии на шинах питания. Спектр гармоник, вызванных коммутациями IGBT-модулей, смещен в высокочастотную область. Для его анализа необходима иная модель, учитывающая, в частности, паразитные индуктивности и емкости элементов.

Величина эквивалентного сопротивления $R_{Ик}$ может быть определена на основе баланса активных мощностей. В резисторе $R_{Ик}$ схемы замещения рис. 4 рассеивается активная мощность

$$P_{dk} = \frac{U_{dk}^2}{R_{Ик}}, \quad (1)$$

где U_{dk} – напряжение питания инвертора k-го ПЧ.

От выпрямителя k-го ПЧ отбирается активная мощность

$$P_{dk} = \frac{H_{ном.k} \cdot Q_{ном.k}}{\eta_{пч.k} \cdot \eta_{эл.дв.k} \cdot \eta_{вент.k}} \left(\frac{\omega_k}{\omega_{ном.}} \right)^3 = P_{dk.ном.} \left(\frac{f_{пч.k}}{f_{пч.ном.}} \right)^3, \quad (2)$$

где $H_{ном.k}, Q_{ном.k}$ – соответственно номинальные величины напора и расхода k-го вентилятора;

$\eta_{пч.k}, \eta_{эл.дв.k}, \eta_{вент.k}$ – соответственно КПД преобразователя, электродвигателя и вентилятора;

$f_{пч.ном.}, f_{пч.k}$ – номинальное и текущее значение частоты напряжения на выходе ПЧ, которым соответствуют значения частоты вращения вентилятора $\omega_{ном.}, \omega_k$.

В формуле (2) также введено обозначение:

$$P_{dk.ном.} = \frac{H_{ном.k} \cdot Q_{ном.k}}{\eta_{пч.k} \cdot \eta_{эл.дв.k} \cdot \eta_{вент.k}} - \text{мощность, потребляемая от выпрямителя k-го ПЧ в}$$

номинальном режиме работы электропривода.

Объединяя выражения (1) и (2), получим формулу для расчета эквивалентного сопротивления инвертора k-го ПЧ:

$$R_{Ик} = \frac{U_{dk}^2}{P_{dk.ном.}} \cdot \left(\frac{f_{пч.ном.}}{f_{пч}} \right)^3. \quad (3)$$

Отметим, что входящая в формулу (3) величина напряжения U_{dk} зависит от напряжения на шине питания ЭТК, а также от тока I_{dk} выпрямителя, который, в свою очередь, является функцией сопротивления $R_{Ик}$.

Модель рассматриваемого электротехнического комплекса реализована в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink. Для решения дифференциальных уравнений

модели выбран многошаговый метод переменного порядка ode15s (stiff/NDF). Относительная погрешность интегрирования задана величиной 10^{-3} .

Некоторые результаты моделирования представлены на рис. 5. Кривая тока источника электроснабжения (рис. 5а) получена для случая, когда 12 единиц ПЧ подключены к одной секции шин по схеме рис. 1. Коэффициент искажения этой кривой превышает 26%. Если применить схему рис. 3 и к каждой подсекции шин подключить по 6 единиц ПЧ, то кривая тока существенно улучшается (рис. 5б). Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока составляет 11%.

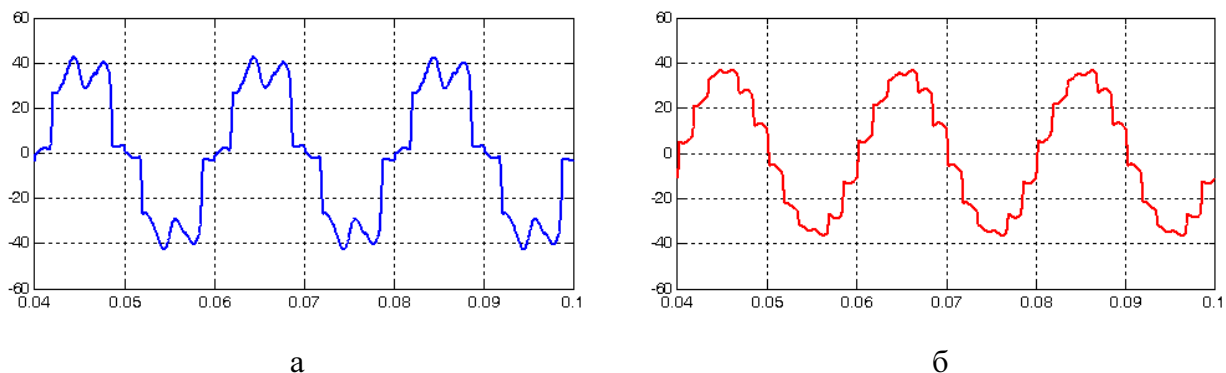


Рис. 5. Виртуальные осциллограммы тока источника электроснабжения: по оси абсцисс – время в секундах; по оси ординат – ток в амперах.

В среде MATLAB+Simulink построена также модель электротехнического комплекса КС, в состав которого входит источник электроснабжения (трансформатор энергоснабжающей организации или ЭСН) и определенное количество КТП для электроснабжения УОГ с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов.

С помощью этой модели рассчитаны показатели качества электроэнергии, характеризующие искажение формы кривой напряжения в СЭС газотурбинной КС, в зависимости от количества КТП, подключенных к источнику электроснабжения. В качестве источника электроснабжения рассматривались трансформаторы ТДН 110/10 кВ мощностью 10000 и 16000 кВА, а также ЭСН типа ПАЭС-2500.

Результаты расчета показали, что при построении КТП по схеме рис. 1 коэффициент искажения синусоидальности напряжения превышает нормально допустимое значение 5% для сетей напряжением 10 кВ, если частотно-регулируемым электроприводом оснащены шесть УОГ (при питании от трансформатора мощностью 10000 кВА) и две УОГ (при питании от ЭСН).

Переход к схеме рис. 3, в соответствии с которой секция шин 0,4 кВ разделяется на две подсекции с питанием от обмоток трансформатора, соединенных по схеме «звезда» и «треугольник», позволяет радикальным образом изменить в лучшую сторону ситуацию с

качеством электроэнергии на шинах 10 кВ. Если питание КТП осуществляется от трансформаторов энергоснабжающей организации, то частотно-регулируемым электроприводом может быть оснащено более десяти УОГ без нарушения заданных требований к качеству электроэнергии. При питании от ЭСН коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах 10 кВ превышает нормально допустимое значение 5% при подключении четырех и более КТП.

Список литературы

1. Аршакян И.И., Артюхов И.И. Динамические режимы в системах электроснабжения установок охлаждения газа. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2004. – 120 с.
2. Аршакян И.И., Тримбач А.А., Артюхов И.И. Опыт создания и эксплуатации системы стабилизации температуры газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа // Проблемы электроэнергетики : сб. науч. тр. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2008. – С. 55–64.
3. Вопросы качества электроэнергии в системах электроснабжения газотурбинных компрессорных станций магистральных газопроводов / И.И.Артюхов [и др.] // Проблемы электроэнергетики : сб. науч. тр. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2007. – С. 19–32.
4. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 32 с.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
6. СТО Газпром 2-6.2-149-2007. Категорийность электроприемников промышленных объектов ОАО «Газпром». – М. : ВНИИГАЗ, 2007. – 38 с.
7. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др. – М. : Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.

Рецензенты:

Митяшин Н.П., д.т.н., профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина, г. Саратов.

Степанов С.Ф., д.т.н., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина, г. Саратов.