

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ
И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.314:621.65

И.И. АРТЮХОВ

С.В. МОЛОТ

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
КОТЕЛЬНЫХ И ЦЕНТРАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ
ПРИ ОСНАЩЕНИИ НАСОСОВ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМELECTRIC POWER QUALITY IN ELECTRIC POWER SYSTEMS OF BOILER STATIONS
AND HEATING SUBSTATIONS USING PUMPS OPERATED BY VARIABLE-FREQUENCY DRIVE

Интенсивное внедрение устройств силовой электроники в различные инженерные системы на объектах жилищно-коммунального хозяйства сопровождается проблемой их негативного влияния на источники электропитания. Характерным примером является использование частотно-регулируемого электропривода насосов в котельных и центральных тепловых пунктах. Наряду с экономией электроэнергии происходит снижение показателей ее качества, характеризующих форму напряжения в сети. Ситуация еще более усугубляется при переводе электроснабжения котельной на резервный источник, например, дизель-генератор. С помощью имитационной модели, построенной в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink, анализируются показатели качества электроэнергии в различных ситуациях. Даются рекомендации о необходимости принятия мер, обеспечивающих заданное качество электроэнергии в системе электроснабжения.

Ключевые слова: котельная, насосы, частотно-регулируемый электропривод, резервный генератор, качество электроэнергии, несинусоидальность, высшие гармоники, имитационное моделирование

Важнейшим направлением в решении проблемы энергосбережения в инженерных системах городского хозяйства является применение частотно-регулируемого электропривода насосных и вентиляционных агрегатов [1]. При этом экономия энергии зачастую достигается не только за счет уменьшения энергопотребления собственно приводом, но и благодаря возможности реализовать более совершенные технологические процессы и алгоритмы управления. Это может быть оптимиза-

Power electronics devices are widespread in different engineering systems for housing and public utilities. But they have negative impacts on the power source. A typical example is using of the pumps, operated by variable frequency drive, in boiler stations and heating substations. The using helps both the energy savings and the electric power quality declination. If boiler station is supplied by emergency generator the electric power quality declination significantly increases. Electric power quality parameters are analyzed using a simulation model, built in MATLAB/Simulink, in different situations. The recommendations to ensure the specified electric power quality in the electric power system are created.

Keywords: boiler station, pumps, variable-frequency drive, emergency generator, electric power quality, non-sinusoidal waveform, higher harmonics, simulation

ция режимов горения в котле за счет регулирования производительности тягодутьевых машин, рационализация теплогидравлических режимов на тепловых вводах в здания путем количественно-качественного регулирования и т.п. Экономия электроэнергии при использовании частотно-регулируемых приводов в насосных и тягодутьевых механизмах котельных установок составляет до 30 %.

Согласно п. 16.6 свода правил СП 89.13330.2012 «Котельные установки. Актуализированная редак-

ция. СНИП П-35-76», которые устанавливают требования к проектированию, строительству, реконструкции, капитальному ремонту, расширению и техническому перевооружению котельных, электродвигатели насосов сетевых, подпиточных, рециркуляционных, горячего водоснабжения, питательной воды, тягодутьевых машин, угольных конвейеров и дробильных установок должны оснащаться преобразователями частоты (ПЧ) и устройствами плавного пуска.

Технология частотного регулирования одновременно с уменьшением расхода электроэнергии позволяет получить дополнительный эффект ресурсосбережения применительно к оборудованию инженерных систем [2], а именно:

- снижение пусковых токов электродвигателей продлевает срок их службы;
- переключение коммутационных аппаратов в бестоковые паузы увеличивает их ресурс;
- оптимизация переходных режимов и уменьшение средней скорости вращения приводов оказывает положительное влияние на работу технологических агрегатов;
- контролируемое изменение напора при переключениях насосных агрегатов позволяет избежать гидравлических ударов и уменьшить вероятности аварий на трубопроводах.

Вместе с тем внедрение частотно-регулируемого электропривода в инженерных системах требует пристального внимания к проблеме, обусловленной негативным влиянием ПЧ на источники электропитания.

Частотно-регулируемый электропривод насосов и вентиляторов является потребителем несинусоидального тока, величина которого и спектральный состав зависят от параметров питающей сети и режима работы электропривода. Современные ПЧ для частотно-регулируемого электропривода выполняют в основном по схеме с промежуточным звеном постоянного тока, основными элементами которой являются неуправляемый (диодный) выпрямитель – сглаживающий фильтр – инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией. 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.

Потребление несинусоидального тока от источника питания приводит к тому, что на последовательных элементах системы электроснабжения (СЭС) возникают падения напряжения несинусоидальной формы. Вследствие этого напряжение в СЭС также приобретает несинусоидальную форму [3].

Для мгновенного значения напряжения на одной фазе СЭС можно записать следующее выражение:

$$u(t) = e(t) - L_0 \frac{di(t)}{dt} - R_0 \cdot i(t), \quad (1)$$

где L_0, R_0 – эквивалентная индуктивность и активное сопротивление фазы источника электроснабжения; $i(t)$ – мгновенное значение тока нагрузки.

ЭДС источника питания в общем случае представляет собой сумму гармонических составляющих

$$e(t) = \sum_{n=1}^{\infty} E_{nm} \sin(n\omega_1 t + \psi_n), \quad (2)$$

где E_{nm}, ψ_n – амплитуда и начальная фаза n -й гармоники напряжения; n – номер гармоники; ω_1 – частота основной гармоники.

Выражение (2) в комплексной форме для n -й гармоники примет вид

$$\underline{U}_n = \underline{E}_n - (R + jn\omega_1 L) \cdot \underline{I}_n = \underline{E}_n - \underline{Z}_n \cdot \underline{I}_n, \quad (3)$$

где $\underline{U}_n, \underline{I}_n$ – комплексы гармоник напряжения и тока с номерами n ; \underline{Z}_n – комплекс внутреннего сопротивления источника электропитания на n -й гармонике.

Из выражения (3) следует, что наличие высших гармоник (ВГ) на шинах потребителей обусловлено наличием ВГ как в кривой источника питания $e(t)$, так и в кривой тока нагрузки. При этом форма напряжения в СЭС зависит от соотношения параметров источника электроснабжения и нагрузки.

Отметим, что несинусоидальность напряжения и тока вызывает дополнительные потери и нагрев, а также ускоренное старение изоляции электрооборудования, что подтверждается результатами диагностического обследования различного электроэнергетического оборудования: трансформаторов, кабельных линий, электродвигателей, компенсирующих конденсаторов, преобразовательных устройств, а также генераторов СЭС. Кроме того, ВГ вызывают нарушение работы и ложные срабатывания устройств релейной защиты и автоматики, приводят к сбоям в работе электронных систем управления и вычислительной техники, создают помехи в аппаратуре телемеханики и связи, искажают показания счетчиков электрической энергии и т.д.

В условиях, когда изготовители ПЧ применяют в основном конденсаторные сглаживающие фильтры, уровень ВГ в кривой входного тока ПЧ оказывается соизмеримым с уровнем основной гармоники. Это приводит к появлению высших гармоник напряжения на всех уровнях СЭС. В результате качество электроэнергии в СЭС перестает соответствовать требованиям ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества

электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Ситуация с качеством электроэнергии на шинах питания инженерных систем с частотно-регулируемым электроприводом усугубляется, когда электрооборудование объекта отключается от трансформатора и присоединяется к резервному источнику, например, дизель-генератору. Это обусловлено тем, что генераторы резервных источников питания имеют совершенно иные внутренние сопротивления Z_n , входящие в выражение (3), чем трансформаторы соизмеримой мощности. При этом возможность работы электрооборудования котельных и тепловых пунктов четко определена указанным выше сводом правил СП 89.13330.2012. Согласно п. 8.1 котельные, вырабатывающие в качестве теплоносителя воду с температурой более 95 °С, должны быть обеспечены двумя независимыми источниками электропитания. Для котельных, имеющих паровые котлы с общей установленной тепловой мощностью более 10 МВт, в качестве второго независимого источника электропитания могут быть использованы турбогенераторы напряжением 0,4 кВ. Тип и количество турбогенераторов обосновываются расчетом. Для котельных, работающих на жидком или газообразном топливе, в качестве второго источника электропитания могут быть использованы электрогенераторы с приводом от дизельных установок, работающих на жидком или газообразном топливе.

Электродвигатели сетевых и подпиточных насосов в котельных, вырабатывающих в качестве теплоносителя воду с температурой выше 115 °С, а также питательных насосов (при отсутствии питательного насоса с паровым приводом), независимо от категории котельной как источника отпуска теплоты, а также все котельные, работающие на твердом топливе, независимо от параметров теплоносителя относятся по условиям электроснабжения к первой категории.

Объекты, ограничение режима потребления электроэнергии которых может привести к возникновению угрозы жизни и здоровью людей, к которым относятся котельные, должны иметь независимый источник питания для обеспечения бесперебойного питания при перерывах в электроснабжении. Указанные требования к эксплуатации электроустановок предъявляются пп. 1.2.18; 1.2.19 Правил устройств электроустановок, утвержденных Приказом Минэнерго РФ от 08.07.2002, № 204, предусматривающих, что электроприемники первой категории в нормальных режимах должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, и перерыв их электроснабжения при нарушении электроснабже-

ния от одного источника питания может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания. В качестве второго независимого источника питания для остальных приемников первой категории могут быть использованы местные электростанции, электростанции энергосистем, предназначенные для этих целей агрегаты бесперебойного питания, аккумуляторные агрегаты бесперебойного питания, аккумуляторные батареи и т.п.

Отсутствие резервного источника электропитания в случае прекращения подачи электроэнергии на котельную может повлечь за собой остановку оборудования в отопительный период, размораживание систем тепло-водоснабжения, что приведет к чрезвычайной ситуации в муниципальном образовании, массовому нарушению прав граждан на защиту жизни, здоровья и личного имущества.

Согласно ГОСТ 32144-2013 показателями качества электроэнергии (ПКЭ), характеризующими несинусоидальность кривой напряжения, являются коэффициенты K_U и $K_{U(n)}$, для расчета которых используется представление периодических функций рядами Фурье.

Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения рассчитывается как отношение действующего значения n -й гармоники к действующему значению U_1 первой гармоники

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U определяется отношением действующего значения ВГ к напряжению U_1 основной гармоники

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $N = 40$ – порядок (номер) последней из учитываемых ВГ.

Из (4) и (5) следует, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения можно определять также по формуле

$$K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} K_{U(n)}^2}. \quad (6)$$

Отклонение формы токов от синусоиды можно характеризовать коэффициентами, которые рассчитываются по формулам, аналогичным (4) – (6).

Коэффициент n -й гармонической составляющей тока

$$K_{I(n)} = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} K_{I(n)}^2} \quad (8)$$

Проанализируем, для примера, качество электроэнергии в СЭС объекта, схема которого показана на рис. 1. Электродвигатели насосов М1 и М3 мощностью 40 кВт могут получать электропитание как через преобразователи UF1, UF2, так и напрямую от шины 0,4 кВ/50 Гц. От этой же шины, при необходимости, запитывается электродвигатель насоса М2. Шина 0,4 кВ/50 Гц, в свою очередь, может быть подключена как к вторичной обмотке трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 250 кВА, так и к выходу резервного источника питания (дизель-генератору мощностью 325 кВт).

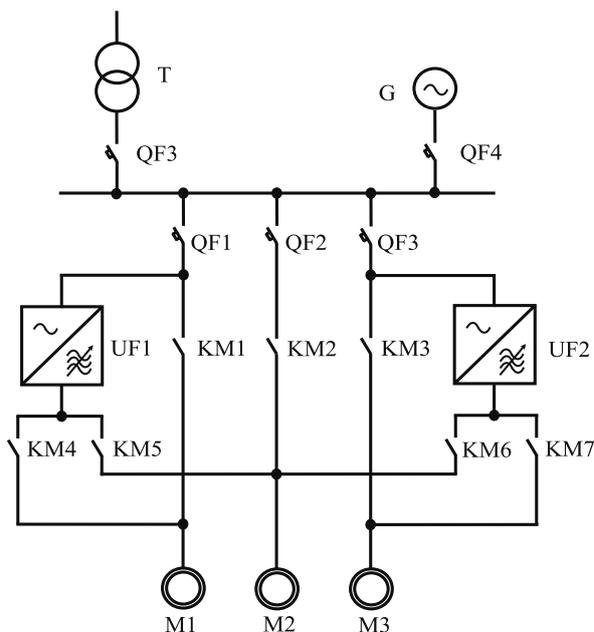


Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения насосов с частотно-регулируемым электроприводом

Исследование процессов в электротехническом комплексе, в состав которого входят электрические машины, полупроводниковые преобразователи и большое количество индуктивных и емкостных элементов, является достаточно сложной задачей [6–9]. Математическая модель, описывающая поведение подобного комплекса, представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка.

Аналитические методы анализа применимы в ограниченном числе случаев. Причина не только в нелинейном характере процессов, происходящих в

исследуемых комплексах, но, в частности, в большой размерности их математических моделей. Поскольку сами объекты исследования представляют собой результаты агрегирования, то и их математические модели могут строиться как агрегаты математических моделей составляющих модулей. Для электротехнических систем это усложнение проявляется в возникновении цепей, общих для двух или более агрегируемых объектов, которые не могли существовать до агрегирования. В частности, это может вызвать неожиданный системный эффект.

Современные программные продукты безусловно позволяют получать численное решение таких систем нелинейных дифференциальных уравнений. В результате решения определяются мгновенные значения токов и напряжений всех элементов электротехнического комплекса, максимальных и интегральных значений тех переменных, которые определяют выбор элементов, спектрального состава кривых напряжений и токов нагрузки, конденсаторов и других элементов. Помимо расчёта отдельных схем возможен анализ работы целых комплексов, содержащих несколько ПЧ и электрических машин.

Для исследования негативного влияния частотно-регулируемого электропривода насосов на СЭС целесообразно применить имитационное моделирование объекта в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink [4]. Схема модели показана на рис. 2. Блоки Three-Phase Source и Three-Phase Transformer моделируют питающую сеть 10 кВ и трансформатор подстанции 10/0,4 кВ. Блоки Diesel Engine Spid&Voltage Control и SM325 kVA отображают дизель-генератор с системами стабилизации частоты вращения вала и напряжения. Блоки Three-Phase Breaker позволяют подключить электрооборудование на электропитание от одного из источников. Блок Three-Phase Parallel RL моделирует активно-индуктивную нагрузку СЭС.

Имитационная модель каждого из частотно-регулируемых электроприводов насосов содержит следующие блоки: Universal Bridge (трехфазный выпрямитель), RS (сетевые дроссели на входе выпрямителя), LD, RD, СФ (сглаживающий дроссель с конденсатором фильтра), RI (эквивалентное сопротивление инвертора).

При построении имитационной модели использован подход [5], который предусматривает представление инвертора напряжения с подключенным электродвигателем в виде эквивалентного активного сопротивления. Правомочность такого представления обусловлена тем, что в рассматриваемом случае целью моделирования является анализ влияния канонических гармоник в спектре входного тока ПЧ на качество электроэнергии в питающей сети. В соответствии с требованиями действующего

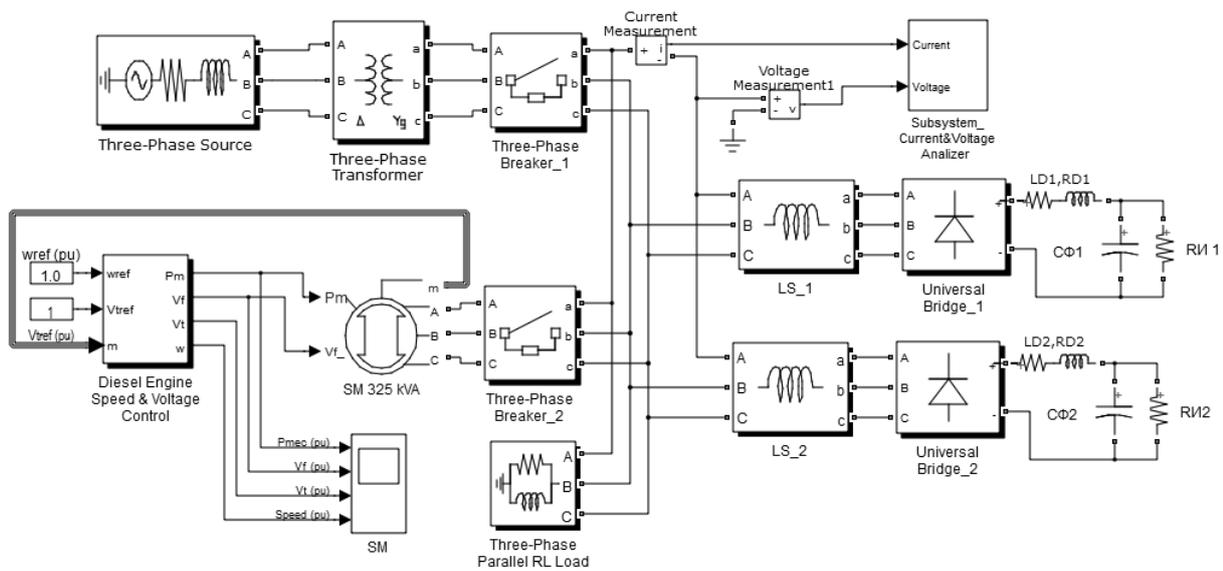


Рис. 2. Схема имитационной модели для исследования качества электроэнергии в СЭС насосов с частотно-регулируемым электроприводом

стандарта на качество электроэнергии при анализе ПКЭ должны учитываться гармоники с частотой до 2 кГц. В качестве силовых полупроводниковых ключей в современных инверторах напряжения применяют в основном IGBT-модули. Тактовая частота работы этих модулей составляет не менее 8 кГц. Поэтому спектр гармоник во входном токе ПЧ, вызванных коммутациями IGBT-модулей, находится в высокочастотном диапазоне, значительно удаленном от частоты 2 кГц. Спектр гармоник во входном токе ПЧ, вызванных коммутациями IGBT-модулей, оказывается смещенным в высокочастотную область.

Величину эквивалентного сопротивления R_{II} определим на основе баланса активных мощностей. В этом резисторе рассеивается активная мощность

$$P_d = \frac{U_d^2}{R_{II}}, \quad (9)$$

где U_d – напряжение питания инвертора.

От выпрямителя ПЧ отбирается активная мощность

$$P_d = \frac{H_{ном.} \cdot Q_{ном.}}{\eta_{пч} \cdot \eta_{эл.дв.} \cdot \eta_{вент.}} \left(\frac{\omega_k}{\omega_{ном.}} \right)^3 = P_{d.ном.} \left(\frac{f_{пч}}{f_{пч.ном.}} \right)^3, \quad (10)$$

где $H_{ном.}$, $Q_{ном.}$ – соответственно номинальные величины напора и расхода k-го вентилятора; $\eta_{пч}$, $\eta_{эл.дв.}$, $\eta_{вент.}$ – соответственно КПД преобразователя, электродвигателя и вентилятора; $f_{пч.ном.}$, $f_{пч.}$ – номинальное и текущее значения частоты напряжения на выходе ПЧ, которым соответствуют значения частоты вращения вентилятора $\omega_{ном.}$, ω .

В формуле (10) также введено обозначение:

$$P_{d.ном.} = \frac{H_{ном.} \cdot Q_{ном.}}{\eta_{пч} \cdot \eta_{эл.дв.} \cdot \eta_{вент.}} - \text{мощность,}$$

потребляемая от выпрямителя ПЧ в номинальном режиме работы электропривода.

Объединяя выражения (9) и (10), получим формулу для расчета эквивалентного сопротивления инвертора

$$R_{II} = \frac{U_d^2}{P_{d.ном.}} \cdot \left(\frac{f_{пч.ном.}}{f_{пч.}} \right)^3. \quad (11)$$

Отметим, что входящая в формулу (11) величина напряжения U_d зависит от напряжения питания, а также от тока выпрямителя I_d , который, в свою очередь, является функцией сопротивления R_{II} .

В составе модели на рис. 2 имеются также сервисные блоки для получения и отображения информации. В частности, для гармонического анализа токов и напряжения в рассматриваемой СЭС используется специально созданный блок Subsystem_Current&Voltage Analyzer.

На рис. 3 показаны результаты моделирования при питании частотно-регулируемых электроприводов от трансформаторов подстанции. При этом полагается, что насосы работают в режиме номинальной производительности, при которой частота напряжения на выходе ПЧ составляет 50 Гц. На рис. 4 приведены графики, которые характеризуют качество электроэнергии в СЭС при подключении электроприводов насосов к дизель-генератору.

Результаты проведенного исследования показывают, что при подключении двух частотно-

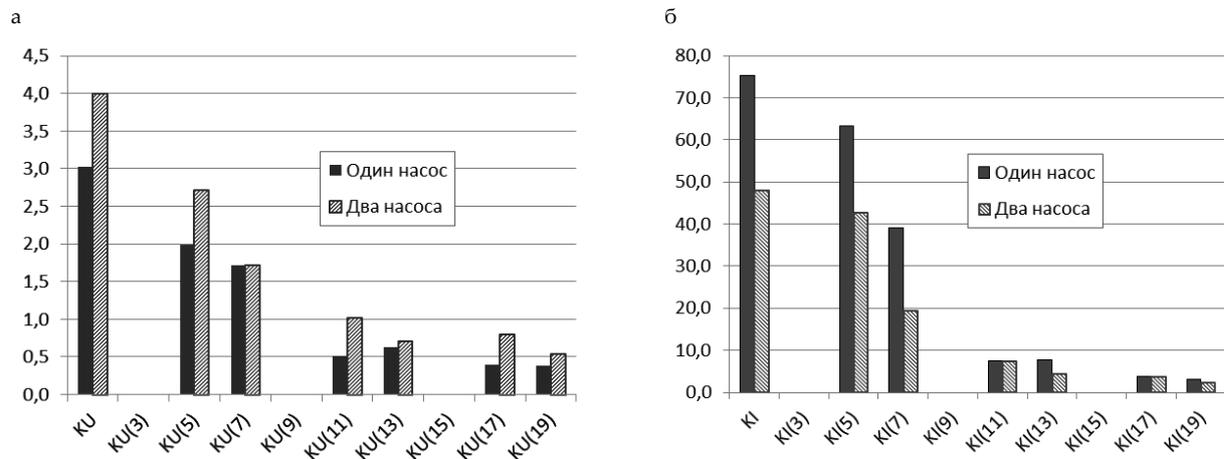


Рис. 3. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих и коэффициентов n -х гармонических составляющих для напряжения (а) и тока (б) при подключении частотно-регулируемых электроприводов насосов к трансформатору подстанции

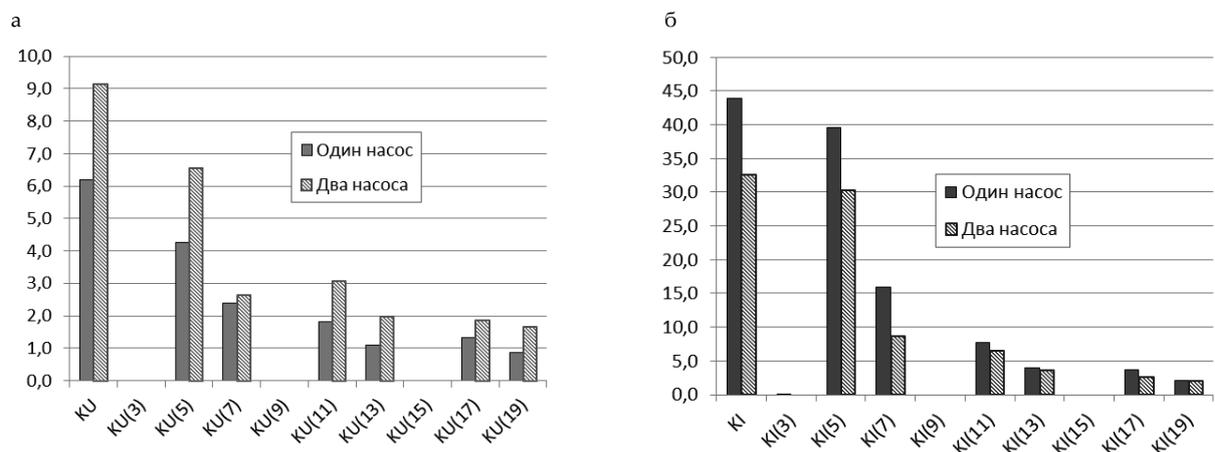


Рис. 4. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих и коэффициентов n -х гармонических составляющих для напряжения (а) и тока (б) при подключении частотно-регулируемых электроприводов насосов к дизель-генератору

регулируемых электроприводов к резервному генератору ПКЭ на шинах электропитания выходят за границы, установленные стандартом на качество электроэнергии. В частности, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений превышает нормативные 8 %. Кроме того, наблюдается превышение допустимых значений гармониками напряжения с номерами 5, 11, 13 и 19. Уровни остальных ВГ напряжений находятся вблизи допустимых значений.

Заметим, что при переводе электропитания насосов на резервный генератор коэффициенты гармоник в кривой потребляемого тока уменьшаются, что объясняется увеличением эквивалентной индуктивности во входной цепи ПЧ. Однако суммарный уровень ВГ остается настолько большим, что может

приводить к существенным потерям мощности в генераторе. Наибольшую интенсивность имеют гармоники тока с номерами 5 и 7. В связи с этим для надежной работы дизель-генератора его мощность должна выбираться большей, чем это требуется при работе на асинхронных двигателях без ПЧ.

Таким образом, возникает необходимость решения комплекса задач по обеспечению электромагнитной совместимости частотно-регулируемого электропривода насосов с источниками питания. В противном случае процесс оснащения инженерных систем частотно-регулируемыми электроприводами может привести к ситуации, когда в результате значительного содержания ВГ в СЭС будет нарушено нормальное функционирование электрооборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
2. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
3. Артюхов И.И., Бочкарева И.И., Молот С.В. Влияние частотно-регулируемого электропривода вентиляторов на питающую сеть // Научное обозрение. 2015. № 4. С. 29–35.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. 288 с.
5. Артюхов И.И., Молот С.В. Имитационная модель для анализа электромагнитной совместимости многодвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода с питающей сетью // Вопросы электротехнологии. 2015. № 4(9). С. 33–38.
6. Галицков С.Я., Галицков К.С., Баскаков А.В. Автоматизация уплотнения бетонной смеси в форме двухвальными вибровозбудителями: монография / СГАСУ. Самара, 2012. 280 с.
7. Галицков С.Я., Галицков К.С., Масляницын А.П. Динамика асинхронного двигателя / СГАСУ. Самара, 2004. 280 с. Изд. 2-е, испр.
8. Галицков К.С., Назаров М.А. Математическая модель нагрузочного момента двигателя шнекового преса при формовании керамических камней // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре [Электронный ресурс]: материалы 71-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР / под ред. М.И. Бальзанникова, Н.Г. Чумаченко; СГАСУ. Самара, 2014. С. 1004–1008.
9. Галицков К.С., Назаров М.А. Алгоритм согласованного управления электротехническим комплексом формования керамической массы при производстве кирпича // Интерстроймех-2014: материалы Международной научно-технической конференции / СГАСУ. Самара, 2014. С. 194–197.

Об авторах:

АРТЮХОВ Иван Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехнологии Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Институт энергетики и транспортных систем
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: ivart1954@gmail.com

ARTYUKHOV Ivan I.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Electrical Power Engineering Chair
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Institute of Energy and Transport Systems
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya, 77
E-mail: ivart1954@gmail.com

МОЛОТ Светлана Викторовна

аспирант кафедры электроснабжения и электротехнологии Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Институт энергетики и транспортных систем
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: sve_1992@mail.ru

MOLOT Svetlana V.

Postgraduate student of the Electrical Power Engineering Chair
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Institute of Energy and Transport Systems
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya, 77
E-mail: sve_1992@mail.ru

Для цитирования: Артюхов И.И., Молот С.В. Качество электроэнергии в системах электроснабжения котельных и центральных тепловых пунктов при оснащении насосов частотно-регулируемым электроприводом // Градостроительство и архитектура. 2017. Т. 7, № 1. С. 138-144. DOI: 1017673/Vestnik.2017.01.23.

For citation: Artyukhov I.I., Molot S.V. Electric power quality in electric power systems of boiler stations and heating substations using pumps operated by variable-frequency drive // Urban Construction and Architecture. 2017. V. 7, № 1. Pp. 138-144. DOI: 1017673/Vestnik.2017.01.23.