



УДК 621.314.6

## ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ КОМПЕНСАТОРА ТОКОВ ИСКАЖЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 КВ

Х.М.МУНЬОС-ГИХОСА<sup>1</sup>, С.Б.КРЫЛЬЦОВ<sup>2</sup>, С.В.СОЛОВЬЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Мадридский политехнический университет, Мадрид, Испания

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматриваются вопросы использования активного выпрямителя в неполностью загруженном по мощности частотно-регулируемом приводе в качестве активного фильтра токов высших гармоник, а также компенсатора потерь напряжения, вызванных наличием в распределительной сети мощной нелинейной нагрузки. На основе математической модели трехуровневого инвертора, который подключается к сети 6-10 кВ без понижающего трансформатора, разработана система прямого управления мощностью активного выпрямителя, способная одновременно компенсировать токи нелинейных искажений при неполной загруженности выпрямителя по активной мощности, потребляемой нагрузкой, а также стабилизировать напряжение с помощью управления реактивной мощностью на входе установки. Эффективность работы активного выпрямителя в режиме компенсации искажений оценивалась на основе компьютерного моделирования участка распределительной сети как функция зависимости от соотношения между токами линейной и нелинейной нагрузки в сети, а также от загруженности силового преобразователя по активной мощности.

**Ключевые слова:** активный выпрямитель; активный фильтр; нелинейные искажения токов и напряжений; прямое управление мощностью инвертора

**Как цитировать эту статью:** Х.М.Муньос-Гихоса. Применение активного выпрямителя в качестве компенсатора токов искажений в распределительных сетях 6-10 кВ / Х.М.Муньос-Гихоса, С.Б.Крыльцов, С.В.Соловьев // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 229-238. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.229

**Введение.** Частотно-регулируемый привод (ЧРП) в настоящее время является основным способом подключения мощной нагрузки к распределительной сети практически в большинстве отраслей промышленности [7]. Внедрение ЧРП позволяет повысить эффективность технологических процессов, работа диодного моста на входе ЧРП приводит к потреблению из сети токов высших гармоник и, следовательно, к ухудшению качества электроэнергии в распределительной сети.

Традиционно в ЧРП применяется двухуровневый частотный преобразователь (ЧП) с диодным выпрямителем (ДВ) на входе как наиболее простое и недорогое в эксплуатации и производстве решение, позволяющее управлять параметрами двигателя и одновременно поддерживать напряжение звена постоянного тока (ЗПТ) в допустимых пределах. Работа диодного выпрямителя связана с потреблением токов 5-й и 7-й гармоник с амплитудами, достигающими 20 % от основной гармоники, что может привести к искажениям формы напряжения в узлах распределительной сети [5].

Для решения этой проблемы в современном ЧРП на входе устанавливают активный выпрямитель (АВ), построенный на базе IGBT-модулей, способных работать в четырех квадрантах [2]. ЧРП с АВ способен потреблять из сети токи, близкие к синусоидальным, одновременно обеспечивая единичный коэффициент мощности на входе установки. Такая топология выпрямителя идентична силовой топологии параллельных компенсаторов типа D-STATCOM семейства средств гибкой передачи переменного тока (flexible AC transmission systems – FACTS). D-STATCOM способен осуществлять следующие функции для повышения качества электрической энергии трехфазных распределительных сетей: статическая компенсация реактивной мощности, стабилизация напряжения, фильтрация токов высших гармоник и компенсация несимметрии питающих напряжений [9].

Возможность использования АВ в качестве компенсатора искажений вызывает интерес у научного и промышленного сообщества, а также разработчиков силовых устройств. Однако, АВ способен брать на себя функции компенсатора только в случае неполной загруженности по активной мощности, что возможно на регулярной основе в определенных типах силовых установок, например ЧРП в составе шахтных вентиляторов главного проветривания, выход которых на номинальную мощность происходит только к концу срока службы вентилятора [6]. Потребляемая вентилятором мощность имеет кубическую зависимость от скорости воздушного потока, необходимого для ствола шахты, и увеличивается в процессе его проходки. На момент установки ЧРП вентиляторов главного проветривания обычно загружен не более чем на 20 % от номиналь-



ной мощности установки, таким образом свободный ресурс выпрямителя может использоваться для улучшения показателей качества электроэнергии шахтной распределительной сети.

Поскольку распределительные сети существующих шахт содержат множество устройств, представляющих собой нелинейную нагрузку ввиду использования диодного выпрямителя на входе, в работе рассматривается применение АВ в качестве активного фильтра нелинейных токов, потребляемых узлами нагрузки. Для обеспечения фильтрации токов в системах управления (СУ) АВ необходимо использовать специальные алгоритмы управления. В настоящее время существует две основных топологии СУАВ: векторная система управления (ВСУ) и система прямого управления мощностью (СПУМ) АВ. ВСУ выпрямителем аналогична ВСУ инвертором на стороне нагрузки в составе ПЧ [8] и основана на вычислении активной и реактивной составляющих тока, потребляемого АВ, с помощью перехода к синхронной системе координат, ориентированной вдоль пространственного вектора напряжения сети [12]. ВСУ содержит внешний контур управления для обеспечения номинальных значений напряжения ЗПТ и потребляемой (генерируемой) реактивной мощности, которые в свою очередь формируют задания для внутреннего контура управления, вычисляющие форму напряжений, генерируемых на стороне сети силовыми ключами АВ с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Каждый контур содержит по два пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регулятора с обратной связью. Необходимость тонкой настройки ПИД-регуляторов является типичной проблемой для ВСУ.

СПУМ лишена данного недостатка за счет прямого вычисления активной и реактивной мощности, потребляемой АВ, в соответствии с теорией мгновенной мощности, а следование заданию по мощности осуществляется с помощью гистерезисных регуляторов во внутреннем контуре управления, которые не требуют точной настройки и обеспечивают высокую динамику реакции на возмущения. Основным недостатком СПУМ является переменная частота переключения силовых ключей, что приводит к потреблению выпрямителем токов высших гармоник в широком спектре частот и усложняет проектирование входных фильтров для АВ.

Хотя СПУМ из-за высокой динамики является наиболее подходящим алгоритмом управления активными фильтрами, недостатки данной СУ становятся серьезной проблемой в силовых установках мегаваттной мощности, вызывая существенные потери мощности на выходных фильтрах. Решению данной проблемы посвящен ряд научных публикаций, в которых предлагается: квантование частоты переключения гистерезисных регуляторов [10], замена гистерезисных регуляторов прямым [14] или прогнозным [4] расчетом опорных напряжений, которые подаются на блок пространственно-векторной модуляции. В результате предложенных модификаций СПУМ становится наиболее удобной системой управления для АВ, работающего в режиме активной фильтрации.

В работе рассматриваются вопросы эффективности применения АВ для компенсации токов гармонических искажений в распределительной сети, вызванных работой мощной нелинейной нагрузки. Режим активной фильтрации рассмотрен на примере АВ в составе ЧРП вентилятора главного проветривания шахты, построенного в соответствии с трехуровневой топологией с запитываемой диодами нейтралью. На основе математической модели силовой топологии АВ разработан модифицированный алгоритм СПУМ, способный осуществлять нормальную работу установки при одновременной компенсации токов нелинейных искажений.

Для оценки эффективности работы предложенной СУ было проведено компьютерное моделирование в пакете MATLAB / Simulink. Оценка эффективности работы АВ в режиме активной фильтрации производилась за счет изменения активной нагрузки АВ.

**Топология сети.** Работа АВ в режиме фильтрации несинусоидальных токов рассматривалась на примере узла шахтной распределительной сети с радиальной схемой электроснабжения (рис.1). Питание шахты осуществлялось посредством воздушной линии электропередач напряжением 110 кВ и протяженностью 70 км, которая представлена в модели идеальным источником напряжения. Основные потребители шахты подключены к шинам понижающей подстанции 110/6 кВ, которая считается точкой общего подключения нагрузки. В работе рассматриваются два типа нагрузки: линейная распределенная нагрузка, подключенная к ТОП через понижающий трансформатор 6/0,4 кВ и кабельные линии длиной 12 км, и нелинейная нагрузка, представляющая собой ЧРП номинальной мощностью 2 МВт с ДВ, подключенным к ТОП через понижающий трансформатор 6/0,4 кВ и кабельную линию длиной 10 км. Дальнейшая разработка месторожде-

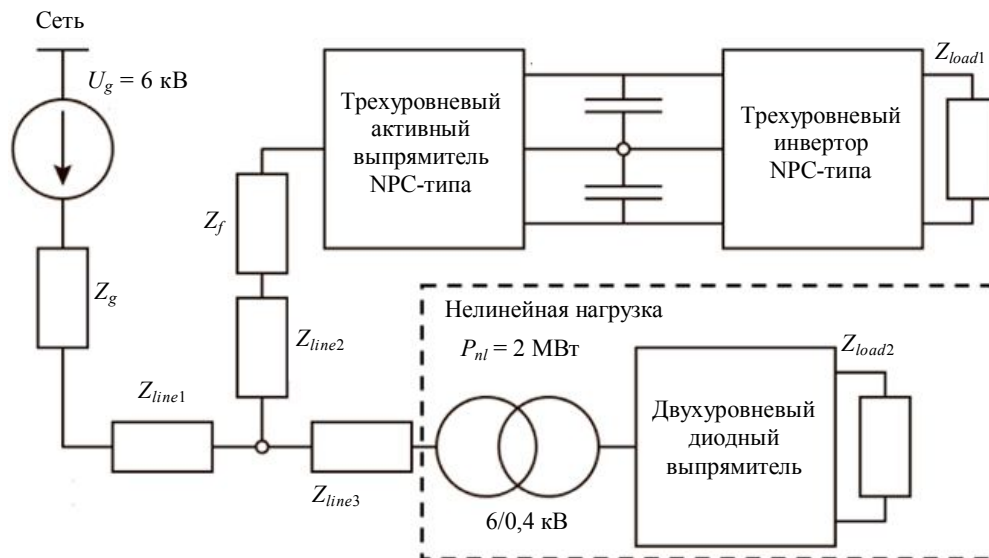


Рис. 1. Структура рассматриваемого узла шахтной распределительной сети

ния привела к необходимости проходки второго ствола шахты, куда и устанавливается дополнительный вентилятор проветривания. Так как наличие мощной нелинейной нагрузки негативно влияет на показатели качества электроэнергии шахтной распределительной сети, принимается решение об установке в АВ в составе ЧРП вентилятора для проветривания нового ствола шахты. Идея работы заключается в оценке эффективности работы ЧРП с АВ для компенсации токов нелинейной нагрузки, уже присутствующей в распределительной сети шахты.

Форма токов, потребляемых узлом сети, зависит от соотношения между мощностью линейной и нелинейной нагрузки. Нелинейные токи в основном представляют собой токи 5-й и 7-й гармоник, потребляемых диодным выпрямителем нелинейной нагрузки, однако, АВ также вносит высокочастотные искажения в спектр токов и напряжений, обусловленные переключением IGBT-ключей.

Гармонический состав токов и напряжений в распределительной сети регулируется стандартом IEEE 519. В соответствии с IEEE 519 суммарный коэффициент гармонических искажений по напряжению для сетей с номинальным напряжением 1-69 кВ не должен превышать 5 %, в то время как значение амплитуды любой высшей гармоники напряжения не должно превышать 3 % от амплитуды основной гармоники. Гармонический состав токов в сети регулируется в соответствии с соотношением между значением тока короткого замыкания в ТОП и максимальным током нагрузки. ТОП рассматривается как шина со стороны вторичной обмотки понижающего трансформатора и рассчитывается как  $I_{scr}/I_1 = 74$ , что переводит сеть в класс напряжения 50-100 кВ.

**Математическая модель активного выпрямителя.** В работе рассматривается АВ, подключенный к узлу с нелинейной нагрузкой, что позволяет рассматривать АВ как активный фильтр с переменной мощностью.

Трехуровневая топология ЧРП становится популярным решением для подключения нагрузки к распределительной сети 6-10 кВ благодаря развитию силовых полупроводниковых устройств. По сравнению с двухуровневой топологией трехуровневые ЧРП обеспечивают следующие преимущества: подключение нагрузки мощностью до нескольких мегаватт напрямую к сети (без понижающего трансформатора); распределение нагрузки между силовыми ключами, снижая потери на переключение; уменьшение искажений, вносимых в спектр токов и напряжений и обусловленных переключением силовых ключей, что является серьезной проблемой для мегаваттных установок из-за экспоненциального увеличения потерь на входном фильтре [3].

В то же время трехуровневая топология выпрямителя с запираемой диодами нейтралью (Neutral Point Clamped – 3-NPC) остается относительно простой и дешевой для производства по сравнению с другими многоуровневыми топологиями. Недостатком многоуровневого инвертора является возможность возникновения несбалансированных напряжений на конденсаторах в звене постоянного тока, что требует внедрения в СУ дополнительных алгоритмов управления [11].

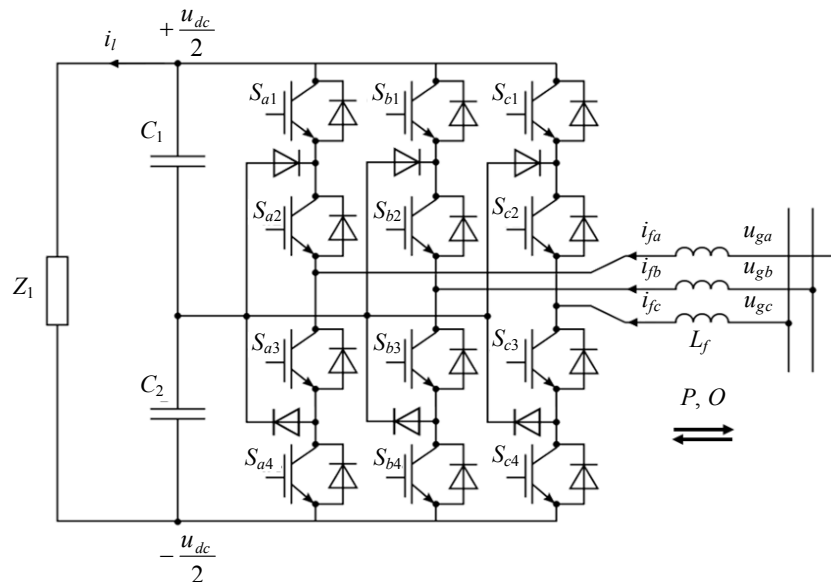


Рис.2. Структура активного выпрямителя, реализованного в соответствии с 3-NPC топологией

Структура 3-NPC АВ в составе ЧРП представлена на рис.2.

Математическая модель АВ описывается следующим уравнением:

$$\begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ARa} \\ u_{ARb} \\ u_{ARc} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $u_g$  – фазные напряжения на стороне сети;  $i$  – фазные токи;  $R_f, L_f$  – сопротивление и индуктивность входного фильтра;  $u_{AR}$  – фазные напряжения на входе АВ, которые могут быть выражены как

$$\begin{bmatrix} u_{ARa} \\ u_{ARb} \\ u_{ARc} \end{bmatrix} = u_{dc} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$u_{dc}$  – напряжение ЗПТ;  $S$  – функции коммутации силовых ключей, которые в трехуровневом выпрямителе для каждой фазы представлены функциями состояния  $P, O, N$ , определяемыми в соответствии с таблицей ( $u_{pn}$  – напряжение в одной фазе АВ).

Тогда закон сохранения напряжений для ЗПТ принимает следующий вид:

$$C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_1, \quad (3)$$

где  $C_{dc}$  – емкость одного конденсатора в составе ЗПТ;  $i_1$  – ток нагрузки.

**Система управления активным выпрямителем.** Предлагается использование СПУМ для управления АВ. Структура предлагаемой системы представлена на рис.3. СПУМ содержит следующие блоки: 1 – вычисления мгновенной мощности на стороне сети; 2 – извлечения основной гармонике токов и напряжений сети; 3 – вычисления угла пространственного вектора напряже-

ния сети; 4 – определения сектора пространственного вектора напряжения сети; 5 – расчета мгновенной мощности искажений на нагрузке; 6 – контур управления напряжением ЗПТ; 7 – блок ограничения мощности, генерируемой АВ для компенсации искажений; 8 – гистерезисные регуляторы; 9 – таблица переключений с балансировкой напряжения на конденсаторах ЗПТ.

Состояния переключения  
 трехуровневого NPS-инвертора

Состояние	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$u_{pn}$
$P$	1	1	0	0	$u_{dc}/2$
$O$	0	1	1	0	0
$N$	0	0	1	1	$-u_{dc}/2$

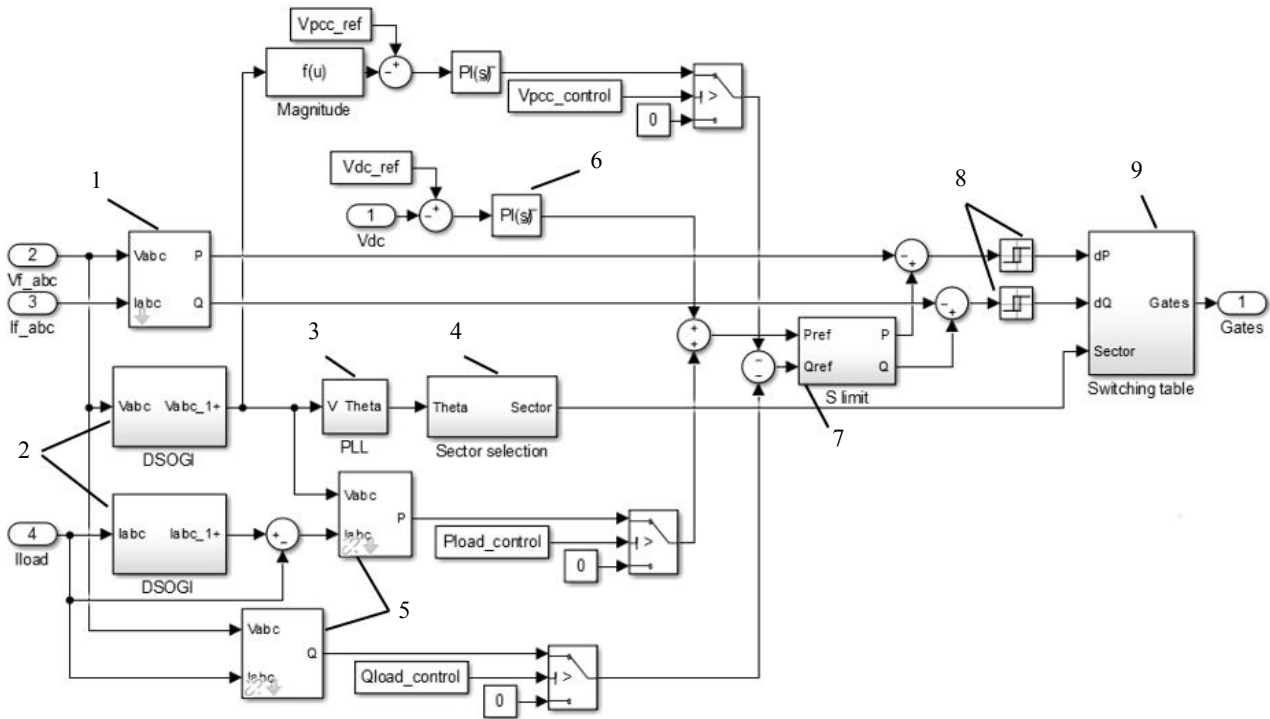


Рис.3. Предлагаемая структура СПУМ АВ

Все расчеты в СПУМ производятся в стационарной двухфазной системе координат, преобразование к которой из трехфазной  $abc$ -системы производится в соответствии с преобразованием Кларка:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (4)$$

СПУМ построена в соответствии с теорией мгновенной мощности. Мгновенные активные и реактивные мощности рассчитываются следующим образом:

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta; \quad (5)$$

$$p = u_\alpha i_\beta + u_\beta i_\alpha.$$

Уравнение (3) подходит только для описания сбалансированных систем синусоидальных напряжений и токов. В других случаях сигналы рассчитанных мгновенных мощностей будут искажены во времени.

Для несбалансированных систем или систем несинусоидальных токов и напряжений сигналы мгновенной активной и реактивной мощности могут быть разделены на постоянные составляющие  $\bar{p}$ ,  $\bar{q}$  и колебательные составляющие  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$ :

$$p = \bar{p} + \tilde{p}; \quad (6)$$

$$p = \bar{q} + \tilde{q}.$$

Полагая, что АВ потребляет близкие к синусоидальным активные токи из сети, баланс мощности для узла сети, показанного на рис.1, записывается в соответствии с теорией мгновенной мощности следующим образом:



$$p_g = \bar{p}_{nl} + \tilde{p}_{nl} + p_{AR};$$
$$q_g = q_{nl}.$$
(7)

Для достижения синусоидальных токов на входе узла сети потребляемая узлом мгновенная активная мощность  $p_g$  не должна иметь колебательной составляющей. Для повышения качества электроэнергии потребляемая узлом сети реактивная мощность также должна быть равна нулю. Тогда задача АВ как компенсатора искажений сводится к компенсации колебательной составляющей активной мгновенной мощности нелинейной нагрузки  $\tilde{p}_{nl}$  и компенсации всей реактивной мощности, потребляемой узлом нагрузки  $q_g$ .

АВ должен обеспечивать номинальное значение напряжения ЗПТ, потребляя активную мощность из сети, что при наличии ПИ-регулятора в контуре управления, описывается уравнением

$$p_{DC}^* = u_{DC} k_{pl} (U_{DC}^* - u_{DC}).$$
(8)

Тогда задания по мгновенной активной и реактивной мощности для АВ определяются следующим образом:

$$p_{AR}^* = u_{DC} k_{pl} (U_{DC}^* - u_{DC}) - \tilde{p}_{ni};$$
$$q_{AR}^* = q_{nl}.$$
(9)

Колебательная составляющая мгновенной активной мощности нагрузки вычисляется в соответствии с (7):

$$\tilde{p}_{nl} = p_{nl} - \bar{p}_{nl}.$$
(10)

Постоянная составляющая  $\bar{p}_{nl}$  чаще всего определяется с помощью фильтрации сигнала колебательной составляющей  $\tilde{p}_{nl}$  из мгновенной активной мощности  $p_{nl}$ . Для этой цели в работе использовался фильтр низких частот Баттерворта [13]. Чтобы обеспечить следование сигналам задания, ключи АВ управляются таблицей переключений, которая также используется для балансировки напряжений конденсаторов ЗПТ [1, 14].

**Моделирование.** Формы сигналов и спектр токов, потребляемых из сети до подключения ЧРП с АВ к узлу нагрузки, показаны на рис.4. Видно, что форма тока значительно искажена,

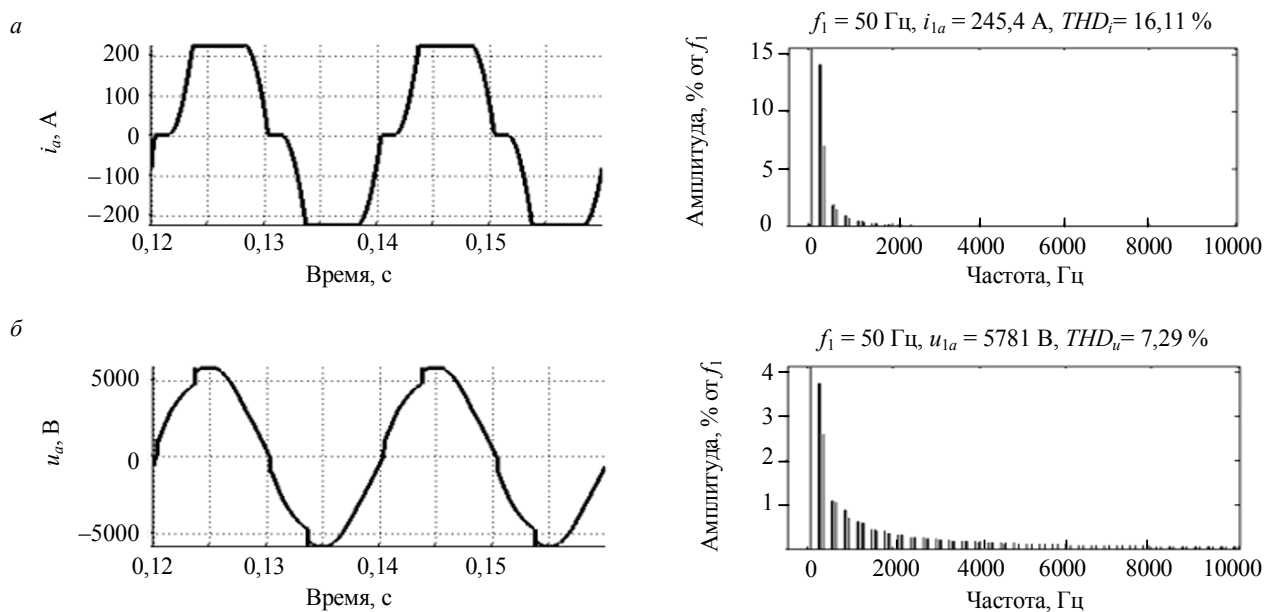


Рис.4. Осциллограммы и спектры токов (а) и напряжений (б) на входе узла нагрузки до подключения ЧРП с АВ

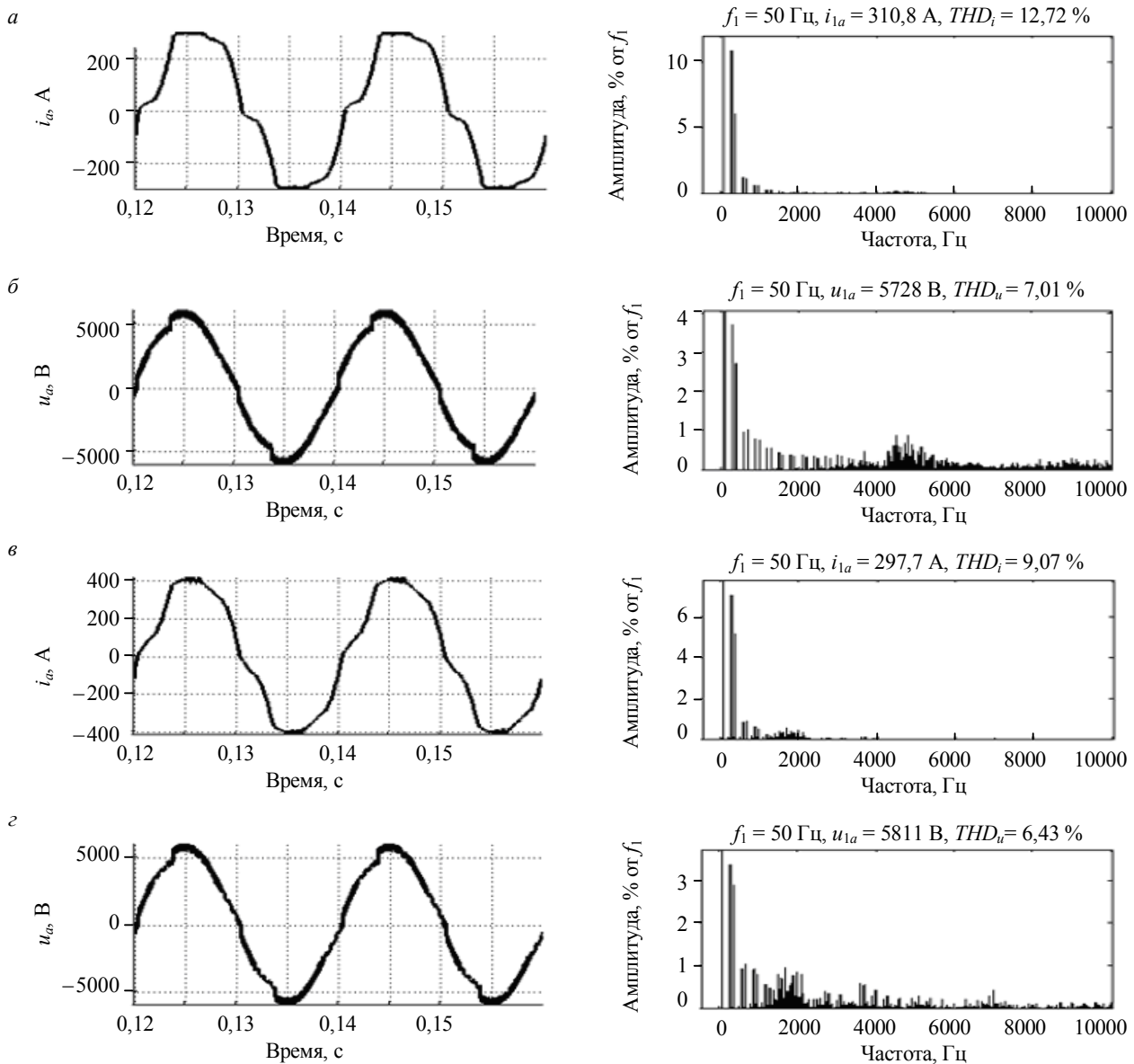


Рис.5. Осциллограммы и спектры токов и напряжений на входе узла нагрузки при подключении ЧРП с АВ, загруженным на 30 % – а, б, и на 80 % – в, г. Функция фильтрации токов нелинейных искажений отключена

что обусловлено присутствием 5-й и 7-й гармоник, потребляемых диодным выпрямителем. Коэффициент гармонических искажений по току  $THD_i$  в этом случае составляет 16,11 %, что приводит к выходу коэффициента гармонических искажений по напряжению  $THD_u$  за допустимые пределы. Его значение составляет 7,29 %, что является недопустимым уровнем в соответствии с IEEE 519.

#### Одновременная работа двух приводов без активной фильтрации токов искажений.

В следующем сценарии моделируется узел нагрузки с подключенным ЧРП с АВ, который потребляет синусоидальные токи из сети (функция активной фильтрации отключена). Форма и спектр токов на входе узла нагрузки были получены для АВ, загруженного по активной мощности на 30 % от номинального значения (рис.5, а, б) и 80 % (рис.5, в, г). Из рис.5 видно, что подключение ЧРП с АВ к узлу сети улучшает форму потребляемых узлом токов:  $THD_i = 9,07 %$  в случае 80 % загруженности АВ; однако, когда АВ загружен только на 30%, форма тока ухудшается:  $THD_i = 12,72 %$ . Это объясняется тем, что поскольку АВ потребляет почти синусоидальные токи, величина основной гармоники увеличивается с 245 А до подключения ЧРП с АВ, до 310 А при подключенном АВ, загруженном на 30 %, и до 412 А при АВ, загруженном на 80 %.

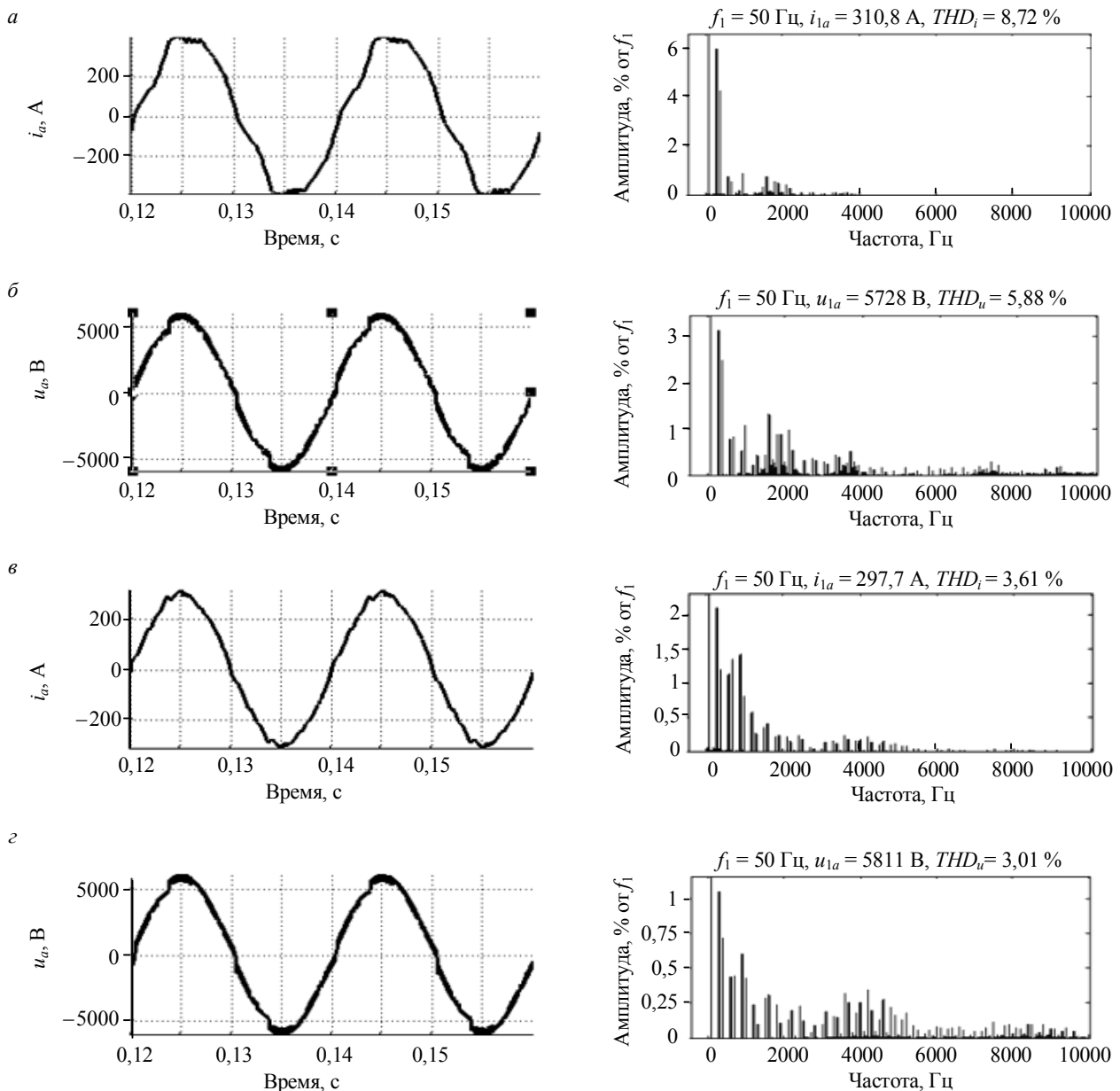


Рис.6. Осциллограммы и спектры токов и напряжений на входе узла нагрузки при подключении ЧРП с АВ, загруженным на 30 % – а, б, и на 80 % – в, г и работающим в режиме активного фильтра токов нелинейных искажений

Следует заметить, что в спектре токов появляются высшие гармоники, обусловленные коммутацией IGBT-модулей в составе АВ, однако их амплитуда намного меньше амплитуд 5-й и 7-й гармоник, потребляемых диодным выпрямителем.

**Одновременная работа двух приводов с активной фильтрацией токов искажений.** На рис.6 показаны результаты моделирования работы АВ с включенной функцией активной фильтрации токов нелинейных искажений. Рассматриваются два варианта загруженности АВ. В случае АВ, загруженного на 80 %,  $THD_i = 8,72\%$ , что достигается за счет использования 20 % запаса по мощности АВ генерации токов, компенсирующих токи нелинейных искажений. Амплитуда компонента основной гармоники, а именно величины 5-й и 7-й гармоник, уменьшаются с 8,6 до 4,3 %, что свидетельствует об эффективности алгоритма активной фильтрации. Снижение загруженности АВ по активной мощности до 30 % приводит к дальнейшему уменьшению  $THD_i$  до 3 %, а амплитуды 5-й и 7-й гармоник уменьшаются до 1 %.

**Оценка эффективности фильтрации токов нелинейных искажений.** Работа АВ в режиме активной фильтрации позволяет значительно уменьшить искажения формы токов, потребляемых узлом сети. Однако, эффективность фильтрации зависит от свободного запаса по мощности АВ



и, соответственно, от загруженности по активной мощности АВ, потребляемой нагрузкой. Для оценки этой зависимости, была проведена серия моделирований с изменением загруженности АВ по активной мощности. Результаты моделирования показаны на рис.7.

**Заключение.** В работе рассмотрено применение АВ в составе ЧРП в качестве компенсатора токов гармонических искажений, вызванных наличием в сети мощной нелинейной нагрузки. Как пример рассмотрен узел шахтной распределительной сети 6 кВ. Для обеспечения фильтрации токов нелинейных искажений была построена система управления АВ, основанная на математической модели трехуровневого АВ с запираемой диодами нейтралью. Оценка эффективности работы АВ в режиме активного фильтра производилась на основе компьютерной модели узла нагрузки, разработанной в среде MATLAB/Simulink и содержащей нелинейную нагрузку в виде ЧРП с диодным выпрямителем номинальной мощностью 2 МВт и ЧРП с активным выпрямителем мощностью 1,5 МВт.

Результаты моделирования показали, что перед подключением ЧРП с АВ узел сети потребляет искаженные токи, что приводит к искажению формы напряжений в узле сети. Подключение ЧРП с АВ к узлу сети позволяет уменьшить коэффициент гармонических искажений по току вдвое без включения функции активной фильтрации, что вызвано увеличением амплитуды основной гармоники токов, потребляемых узлом нагрузки. При включении функции активной фильтрации АВ существенно уменьшает коэффициент гармонических искажений по току на входе узла нагрузки за счет использования для компенсации свободного ресурса по мощности.

На основе результатов моделирования была получена зависимость коэффициента гармонических искажений по току на входе узла нагрузки от загруженности АВ по активной мощности, потребляемой нагрузкой. Полученная зависимость показала эффективность применения АВ в качестве компенсатора гармонических искажений токов в узлах распределительной сети.

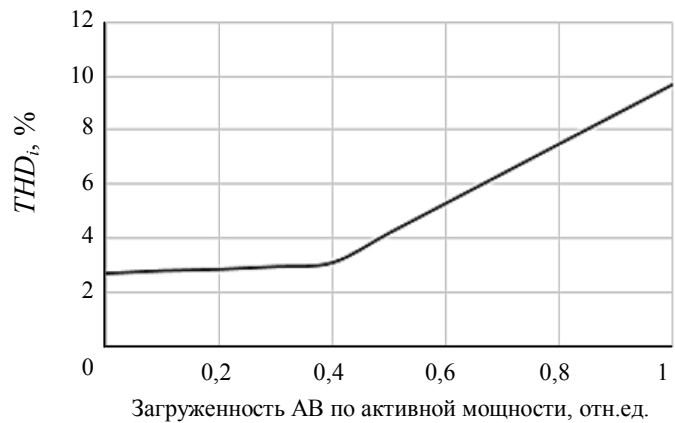


Рис.7. Эффективность фильтрации токов искажений, потребляемых узлом нагрузки, как функция зависимости от загруженности АВ по активной мощности

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов В.Я. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink / В.Я.Фролов, Р.И.Жилиготов // Записки Горного университета. 2018. Т. 229. С. 92-97. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92
2. Abdelli Y. A three-phase PWM rectifier with active filtering function / Y.Abdelli, M.Machmoum, P.Coulibaly // Power System Technology. Proceedings. International Conference. 2002. Vol. 1. P. 485-490.
3. Analysis of the passive damping losses in LCL-filter-based grid converters / R.Pena-Alzola, M.Liserre, F.Blaabjerg, R.Sebastián, J.Dannehl, F.W.Fuchs // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. Vol. 28. Iss. 6. P. 2642-2646.
4. Bouafia A. Predictive direct power control of three-phase pulsewidth modulation (PWM) rectifier using space-vector modulation (SVM) / A.Bouafia, J.P.Gaubert, F.Krim // IEEE Transactions on Power Electronics. 2010. Vol. 25. Iss. 1. P. 228-236.
5. Electric Power Quality Monitoring and Analysis at a Tri-Generation Plant under Development / I.Pisică, L.Lipan, P.Postolache, C.Toader, G.Comănescu, D.C.Dașu // The 11th WSEAS International Conference on mathematical methods and computational techniques in electrical engineering (MMACTEE'10). 2010. P. 654-879.
6. Fisk W.J. Sensor-based demand-controlled ventilation: a review / W.J.Fisk, A.T. De Almeida // Energy and buildings. 1998. Vol. 29. Iss. 1. P. 35-45.
7. Keskar P.Y. Specification of variable frequency drive systems to meet the new IEEE 519 standard // IEEE Transactions on Industry Applications. 1996. Vol. 32. Iss. 2. P. 393-402.
8. Kubota H. Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation / H.Kubota, K.Matsuse // IEEE Transactions on Industry Applications. 1994. Vol. 30. Iss. 5. P. 1219-1224.
9. Lawrence T. Demand-controlled ventilation and sustainability // ASHRAE Journal. 2004. Vol. 46. Iss. 12. P.117-121.
10. Liu S.Y. Analysis of direct power control strategies applied to doubly fed induction generator / S.Y.Liu, V.F.Mendes, S.R.Silva // Proceeding XI Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). 2011. P. 949-954.



11. *Marchesoni M.* Diode-clamped multilevel converters: a practicable way to balance DC-link voltages / M.Marchesoni, P.Tenca // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. Vol. 49. Iss. 4. P. 752-765.
12. *Sanjuan S.L.* Voltage oriented control of three-phase boost PWM converters: design, simulation and implementation of a 3-phase boost battery charger. Master of Science Thesis in Electric Power Engineering. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2010. 114 p.
13. *Selesnick I.W.* Generalized digital Butterworth filter design / I.W.Selesnick, C.S.Burrus // IEEE Transactions on Signal Processing. 1998. Vol. 46. Iss. 6. P. 1688-1694.
14. *Zhang Y.* Deadbeat direct power control of three-phase pulse-width modulation rectifiers / Y.Zhang, W.Xie, Y.Zhang // IET Power Electronics. 2014. Vol. 7. Iss. 6. P. 1340-1346.

**Авторы:** **Х.М.Муньос-Гихоса**, PhD, профессор, [jmguijosa@etsii.upm.es](mailto:jmguijosa@etsii.upm.es) (Мадридский политехнический университет, Мадрид, Испания), **С.Б.Крыльцов**, ассистент, [kryltcov@ouilook.com](mailto:kryltcov@ouilook.com) (Санкт-Петербургский Горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **С.В.Соловьев**, канд. техн. наук, ассистент, [forsakenfour@gmail.com](mailto:forsakenfour@gmail.com) (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 21.01.2019.

Статья принята к публикации 6.03.2019.