

УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ТОКА В СИСТЕМАХ С ТИРИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

За более чем полувековой период эксплуатации систем регулируемого электропривода, построенных на полупроводниковых элементах, в качестве наиболее надежных и экономически эффективных систем зарекомендовали себя тиристорные преобразовательные устройства. Тиристорные преобразователи напряжения (ТПН) заняли свою нишу в качестве устройств плавного пуска (УПП) мощных асинхронных электроприводов и являются перспективными для использования в качестве систем с экономайзером и для разработки устройств регулирования скорости привода. Однако применение ТПН вызывает существенные гармонические искажения формы потребляемого тока. Излишне потребляемая реактивная мощность, потребление постоянного тока при несогласованности углов открытия тиристорных импульсов тока, вызываемые их коммутацией, приводят к возникновению дополнительных потерь электрической энергии в элементах системы электроснабжения, ускоряют старение изоляции токоведущих частей оборудования и негативно влияют на его электромагнитную совместимость. Причем, если для УПП с редкими пусками привода данными воздействиями можно пренебречь, ввиду шунтирования ТПН после разгона двигателя, то для УПП с частыми пусками и систем, где ТПН остается в работе после разгона, их необходимо учитывать. В данной работе описано решение, направленное на компенсацию гармонических искажений потребляемого тока в системах с ТПН. Основным элементом предлагаемого устройства является активный фильтр электроэнергии (АФЭ), выполненный на IGBT-ключках, управляемых релейным регулятором тока. Произведен аналитический обзор процесса компенсации гармонических искажений тока при помощи АФЭ, рассмотрена его структура и подобраны компоненты. Работа ТПН с устройством компенсации была исследована путем математического моделирования в программной оболочке MATLAB Simulink. В статье приведена модель исследования, сравнительные энергетические характеристики и анализ гармонического состава тока для ТПН и системы «ТПН с АФЭ». Осуществлена оценка возможностей и эффективности применения предложенного устройства с УПП.

Ключевые слова: регулируемый электропривод, тиристорный преобразователь напряжения, устройство плавного пуска, экономайзер, гармонические искажения, потери электроэнергии, компенсация гармонических искажений, активный фильтр электроэнергии, релейный регулятор тока, математическая модель, MATLAB Simulink, система электроснабжения.

ВВЕДЕНИЕ

Применяемый в асинхронном электроприводе для обеспечения плавного пуска и торможения двигателя с функцией отсечки по току ТПН состоит в наиболее распространенном случае из 6 включенных встречно-параллельно в каждую фазу тиристорных [1]. Использование данной системы отличается надежностью, простотой и экономичностью. Кроме указанных «классических» применений, перспективными направлениями развития ТПН являются энергосберегающий электропривод [2, 3] и электропривод с регулированием скорости ротора [4].

Но работа данных устройств приводит к искажению форм потребляемого тока и питающего напряжения, дополнительным потерям электроэнергии, перегреву и ускоренному старению оборудования [2, 5].

В существующих по данному вопросу решениях [6, 7] предлагается статическое фильтро-компенсирующее устройство (ФКУ). Необходимо отметить, что использование ФКУ для компенсации широкого ряда гармоник приводит к усложнению их структуры, снижению надежности и увеличению токов короткого замыкания в СЭС [8]. Кроме того, ФКУ являются неэффективными для компенсации постоянного тока, протекающего через ТПН при несогласованном открытии тиристорных [5, 9] и отработки заданного уровня искажений при широком диапазоне динамически изменяющейся нагрузки.

Более результативным решением данной проблемы является использование АФЭ [8], в которых компенсация гармонических токов также осуществляется путем обмена реактивной энергией между фильтром и самой системой ТПН-АД.

Предложенные ранее АФЭ [10 – 13] рассчитаны исключительно на компенсацию искажений при работе на неуправляемый выпрямитель и не могут учитывать изменение угла проводимости ключей, а также неприменимы для компенсации постоянного тока.

Основными задачами при разработке нового технического средства являются модернизация существующего АФЭ для работы с системой «ТПН-АД» и его исследование.

МЕТОДЫ

Напряжение питающей сети $u_c(t)$ в общем случае кроме первой гармоники $u_{c(1)}(t)$ содержит высшие гармоники $u_{c(n)}(t)$. Потребляемый нагрузкой ток $i_n(t)$ также содержит базовую гармонику $i_{n(1)}(t)$ и гармоники высших порядков $i_{n(n)}(t)$. Таким образом, мгновенные ток и напряжение могут быть представлены в следующем виде:

$$u_c(t) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} U_{cm(n)} \cdot \sin(\omega_{(n)}t + \psi_{(n)}); \quad (1)$$

$$i_n(t) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} I_{nm(n)} \cdot \sin(\omega_{(n)}t + \psi_{(n)} + \varphi_{(n)}), \quad (2)$$

где n – порядок гармоники; $U_{cm(n)}$ – амплитуда напряжения сети для n -й гармоники, В; $I_{cm(n)}$ – амплитуда

тока нагрузки для n -й гармоники, А; $\omega_{(n)}$ – угловая частота для n -й гармоники, рад/с; $\psi_{(n)}$ – начальная фаза для n -й гармоники, рад; $\varphi_{(n)}$ – угол сдвига фаз для n -ной гармоники, рад; n_{\max} – максимальный порядок оцениваемой высшей гармоники.

С целью компенсации искажений первой гармоники тока ТПН фильтр должен формировать мгновенный ток $i_{\phi}(t)$, определяемый как

$$i_{\phi}(t) = i_{n(1)}^*(t) - i_n(t) = i_{n(1)}^*(t) - i_{n(1)}(t) - \sum_{n=2}^{n_{\max}} I_{nm(n)} \cdot \sin(\omega_{(n)}t + \psi_{(n)} + \varphi_{(n)}) = - \sum_{n=2}^{n_{\max}} I_{nm(n)} \cdot \sin(\omega_{(n)}t + \psi_{(n)} + \varphi_{(n)}), \quad (3)$$

где $i_{n(1)}^*(t)$ – заданный мгновенный требуемый ток системы «АФЭ-ТПН-АД», который задается по формуле

$$i_{n(1)}^*(t) = i_{n(1)}(t) = I_{nm(1)} \cdot \sin(\omega_{(1)}t + \psi_{(1)} + \varphi_{(1)}). \quad (4)$$

Амплитудное значение тока первой гармоники $I_{nm(1)}$ измеряется в фазах статора, угловая частота $\omega_{(1)}$ и начальная фаза тока $\psi_{(1)}$ устанавливаются по измеряемым и формируемым далее значениям частоты и фазы первой гармоники сетевого напряжения. Угол фазового сдвига тока $\varphi_{(1)}$ в предлагаемом устройстве устанавливается по измеренному на выходе ТПН углу отставания тока нагрузки φ .

Ввиду того, что форма напряжения кроме первой содержит и высшие гармоники, их влияние при формировании задания на мгновенный ток необходимо исключить. Данный эффект достигается посредством быстрого преобразования Фурье формы измеренного сетевого напряжения и выделения из него синусоидального напряжения первой гармоники. Следовательно, формирование мгновенных значений фазных токов нагрузки с учетом вышеописанных утверждений можно описать как

$$\begin{cases} i_{An(1)}^*(t) = I_{Anm(1)} \frac{U_{Acm(1)} \sin(\omega_{(1)}t + 0 + \alpha)}{U_{Acm(1)}} \\ i_{Bn(1)}^*(t) = I_{Bnm(1)} \frac{U_{Bcm(1)} \sin(\omega_{(1)}t + 2\pi/3 + \alpha)}{U_{Bcm(1)}} \\ i_{Cn(1)}^*(t) = I_{Cnm(1)} \frac{U_{Ccm(1)} \sin(\omega_{(1)}t - 2\pi/3 + \alpha)}{U_{Ccm(1)}} \end{cases}, \quad (5)$$

где $i_{A-Cn(1)}^*(t)$, $I_{A-Cnm(1)}(t)$, $U_{A-Ccm(1)}(t)$, – соответственно мгновенный заданный ток нагрузки, амплитудные значения тока нагрузки и сетевого напряжения для фаз А, В и С.

Структурная схема исследуемой системы АФЭ-УПП-АД представлена на рис. 1. В качестве объекта управления здесь выступает УПП, состоящее из ТПН и его системы управления (СУ ТПН) и регулирующее напряжение на асинхронном двигателе M в соответствии с сигналом тока преобразователя I_s , получаемыми от датчиков тока ДТ₁, и скорости ротора на выходе тахогенератора ТГ. СУ ТПН формирует по принципу импульсно-фазного управления угол открытия тиристоров α . Основным элементом АФЭ является инвертор напряжения (ИН), построенный на IGBT-ключях по трехфазной мостовой двухуровневой схеме с включенными в звено постоянного тока накопительным конденсатором C_{ϕ} и блоком заряда емкости БЗ. На входе ИН установлены реакторы L с целью подавления пульсаций тока, привносимых коммутацией ключей. Также в звене постоянного тока АИН установлен датчик напряжения ДН, измеренный сигнал напряжения звена постоянного тока от которого через регулятор напряжения РН поступает в систему управления СУ АФЭ для формирования задания на ток АФЭ.

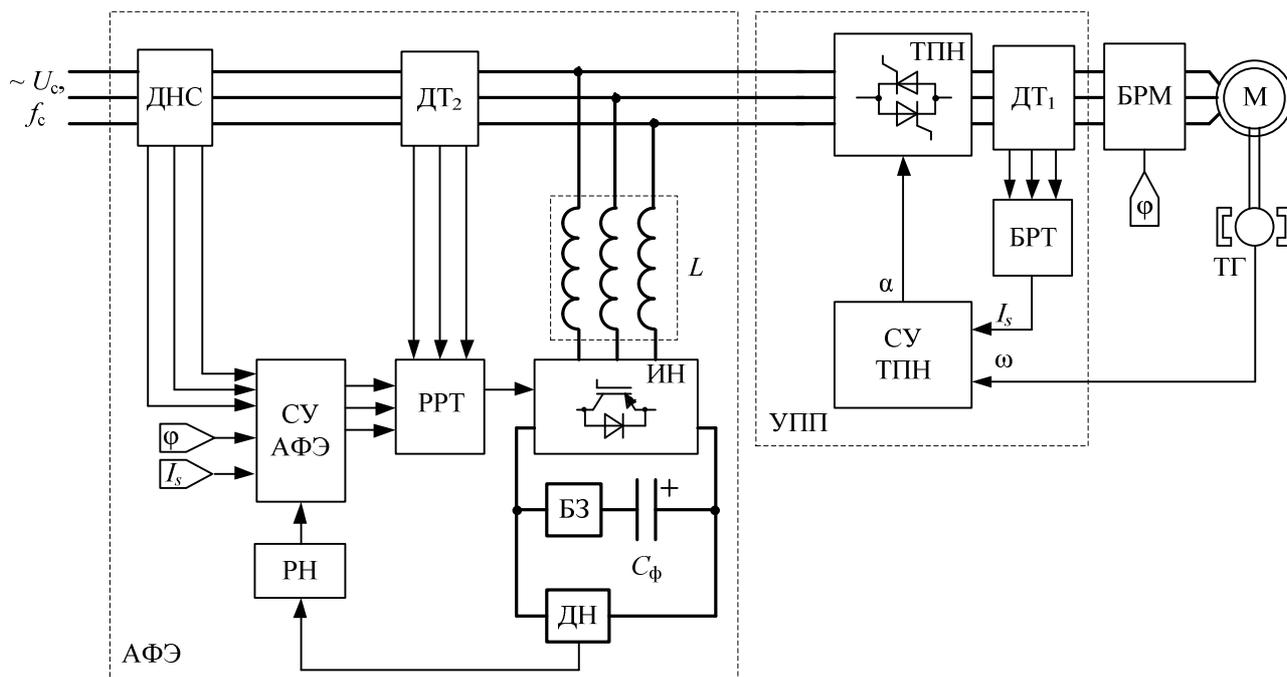


Рис. 1. Структурная схема системы «АФЭ-УПП-АД»

Корректирующее воздействие, привносимое РН, осуществляет «подзаряд» накопительной емкости фильтра, что обеспечивает запас мощности для компенсации искажений потребляемого тока в динамических процессах изменения нагрузки, а также установку величины потребляемого из сети тока, необходимого для работы УПП. Кроме того, в процессе формирования задания на потребляемый ток участвуют сигналы измеренного напряжения сети от датчиков напряжения ДНС, сигнал величины потребляемого двигателем тока и сигнал угла отставания тока нагрузки. Сформированное в СУ АФЭ задание на потребляемый ток фазы сравнивается с мгновенным значением тока фазы на входе системы «АФЭ-УПП-АД» от датчиков тока ДТ₂, и разница этих значений поступает на гистерезисный регулятор, выдающий сигнал на открытие или закрытие IGBT. Шесть гистерезисных регуляторов управляют отдельными ключами и вместе с логикой нахождения разницы между заданным и фактическим значениями потребляемого тока образуют релейный регулятор тока PPT.

Подводя итог обзора принципа работы АФЭ, необходимо отметить, что управление АФЭ по данному принципу обеспечивает обмен реактивной энергией между нагрузкой и фильтром, а также нагрузкой и сетью и, как следствие, исключает гармонические искажения в питающей сети. Однако это не мешает потреблять двигателю для разгона по заданным характеристикам необходимую реактивную энергию из сети. Таким образом, при работе АФЭ реактивная мощность первой гармоники потребляется из сети, а мощность

высших гармоник формирует сам фильтр. Раздельное задание амплитудного значения тока, потребляемого из сети, также позволяет АФЭ решать вопрос фазной несимметрии токов нагрузки.

Подбор мощности АФЭ производится исходя из расчета мгновенной реактивной мощности, потребляемой и генерируемой АФЭ. Емкость накопительного конденсатора подбирается из условия 2%-ного максимального колебания напряжения в звене постоянного тока. Ширина гистерезиса PPT устанавливается опытным путем, учитывая ограничение по максимальной частоте коммутации IGBT и условие наиболее предпочтительных по степени отработки заданного диапазона токовых характеристик.

По представленному математическому описанию и в соответствии с приведенной структурной схемой была составлена математическая модель данной системы в программной оболочке MATLAB Simulink (рис. 2). Питающая сеть здесь представлена трехфазным источником напряжения «Voltage Source» с параметрами: $U_c = 380$ В, $f_c = 50$ Гц. Силовая часть УПП, как было описано ранее, состоит из шести включенных встречно-параллельно в три фазы тиристоров VS1-VS6, вводного и шунтирующего УПП после разгона двигателя контакторов. Управляющие ключами сигналы VS1_1-VS1_6 поступают от блока «СУ_ТПН». Асинхронный двигатель – стандартный двигатель мощностью $P_n = 75$ кВт и напряжением статора $U_n = 380$ В из библиотеки SimPowerSystem. Параметры АФЭ: сглаживающая индуктивность на входе ИН $L = 1$ мГн, емкость накопительного конденсатора звена постоянного тока $C = 5$ мФ.

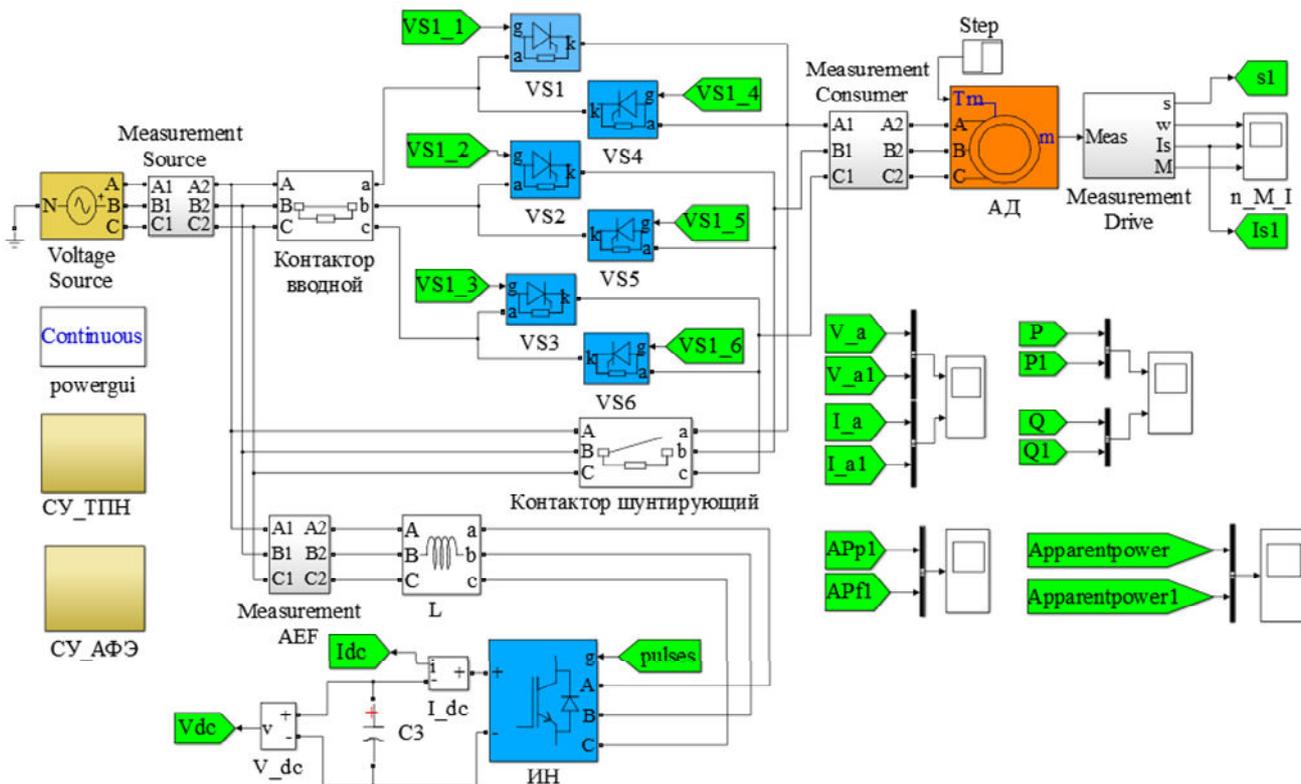


Рис. 2. Математическая модель предлагаемой системы «АФЭ-УПП-АД»

РЕЗУЛЬТАТЫ

Система управления АФЭ (рис. 3), построенная по вышеизложенному принципу, заключена в подсистему «СУ АФЭ» и получает сигналы измеренного сетевого напряжения и тока V_{abc1} и I_{abc1} , угла ϕ нагрузки ϕ_{i_m} , тока нагрузки I_{s1} , напряжения звена постоянно-го тока U_{dc} и управляет IGBT по сигналам «pulses».

В исследуемой модели производятся измерения и вычисления: фазных напряжений, токов фаз, активной, реактивной и полной мощностей, коэффициента мощности сети и угла ϕ измерений «Measurement Source»), двигателя (блок «Measurement Consumer»), фильтра (блок «Measurement AEF»), напряжения и тока в звене конденсатора АФЭ (блоки «U_dc» и «I_dc»), а также скорости, скольжения, момента и тока статора АД (блок «Measurement Drive»).

Также осуществляется анализ гармонического состава тока фазы системы при помощи средств «FFT Analysis» блока «Powergui». Проводится снятие осциллограмм параметров, необходимых для оценки эффективности работы АФЭ, и их сравнение с параметрами системы «УПП-АД». Исследование работы АФЭ осуществляется в процессе разгона двигателя с УПП. Осциллограммы скорости, тока и момента двигателя при разгоне в системе «АФЭ-УПП-АД» представлены на рис. 4. Они полностью совпадают с характеристиками двигателя без АФЭ.

Полная мощность, потребляемая из сети, снижается по отношению к системе без АФЭ в среднем на 25%

(рис. 5, в), так как потребляемая реактивная мощность (рис. 5, б) определяется в данном случае исключительно запаздыванием первой гармоники тока, а реактивная мощность высших гармоник «завязана» на АФЭ. При этом потребляемая активная мощность остается на том же уровне (рис. 5, а). Мощность, потребляемая и генерируемая активным фильтром, составляет в среднем 30% от мощности, которую потребляет УПП-АД (рис. 5, г). Следовательно, из экономических соображений целесообразно выбирать номинальную мощность ИН в треть меньше, чем мощность самого ТПН.

Потребляемый ток повторяет форму напряжения с отставанием ϕ . Осциллограммы сетевого напряжения и тока для систем «УПП-АД» и «АФЭ-УПП-АД» приведены на рис. 6. Сравнение гармонического состава тока производится в течение одного периода посредством инструментов FFT MATLAB. Вертикальная ось на диаграммах соответствует амплитуде приведенных гармоник относительно 100% амплитуды базовой гармоники (50 Гц). На первой диаграмме (рис. 7, а) показан гармонический состав тока системы без АФЭ, суммарный уровень гармонических искажений тока относительно базовой гармоники для нее $THD_1 = 10,45\%$. Наибольшее влияние на форму тока оказывают гармоники порядка $N = 6 \cdot n \pm 1$ ($n = 1, 2, 3 \dots$). Применение АФЭ (рис. 7, б) снижает THD_1 до допустимого уровня 0,91%, полностью исключая влияние гармоник указанного порядка.

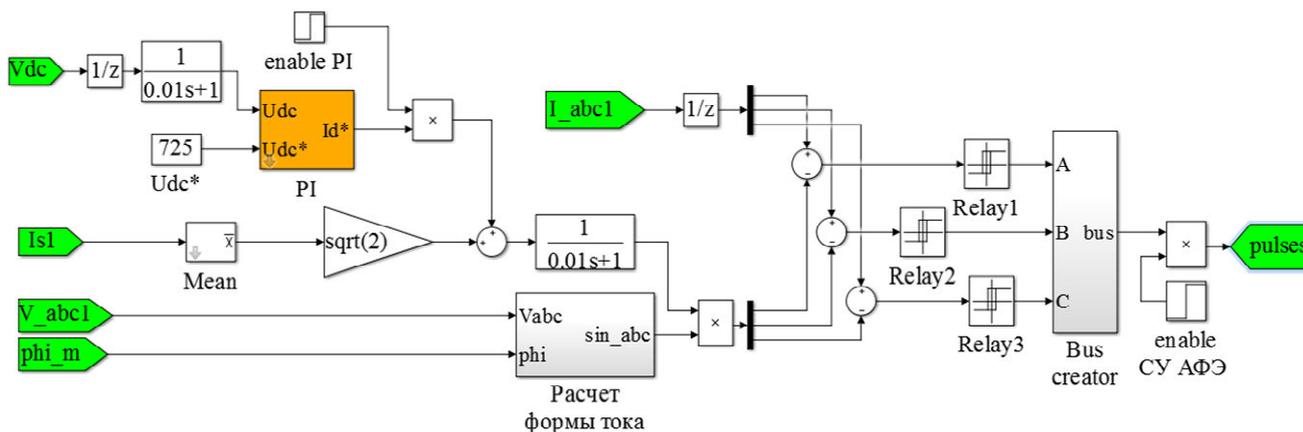


Рис. 3. Структурная схема СУ АФЭ исследуемой математической модели

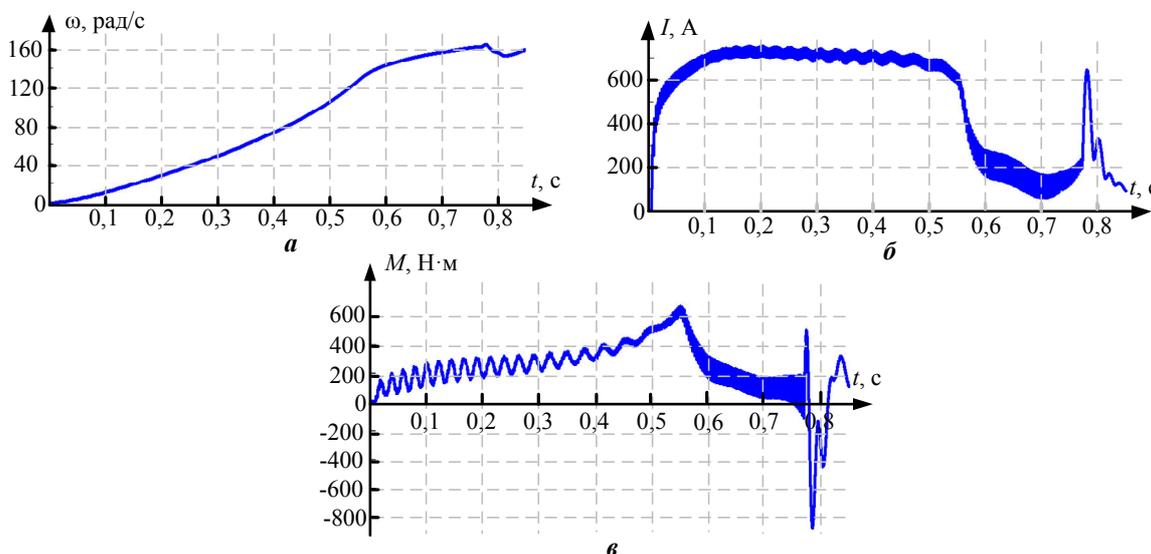


Рис. 4. Характеристики двигателя при разгоне в системе «АФЭ-УПП-АД»: а - угловая скорость ротора; б - ток статора; в - электромагнитный момент

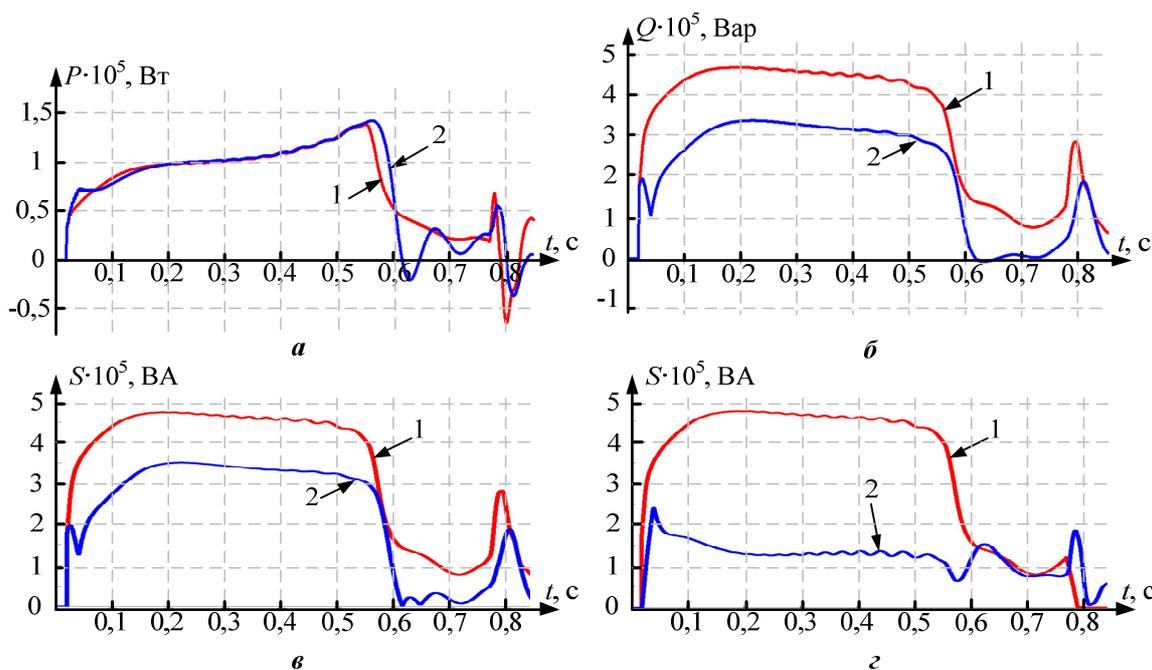


Рис. 5. Графики мощности: а – активная мощность; б – реактивная мощность; в – полная мощность (линия 1 – «УПП-АД», линия 2 – «АФЭ-УПП-АД»); г – полная мощность (линия 1 – УПП, линия 2 - АФЭ)

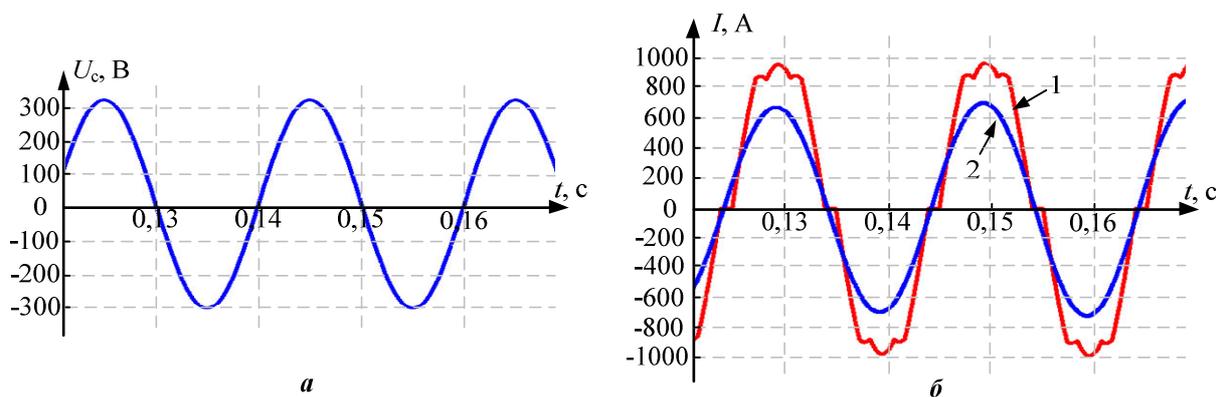


Рис. 6. Осциллограммы сетевого напряжения (а) и потребляемого тока (б): 1 – график тока системы «УПП-АД»; 2 – график тока системы «АФЭ-УПП-АД»

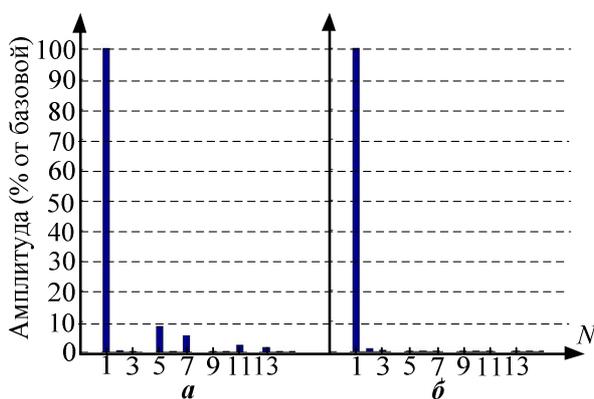


Рис. 7. Диаграммы гармонического состава потребляемого тока: а – «УПП-АД», б – «АФЭ-УПП-АД»

Также необходимо отметить, что включение в структуру АФЭ регулятора напряжения звена постоянного тока ИН позволяет исключить излишнее потребление активной мощности накопительным конденсатором, а также производить ее генерацию в сеть.

Кроме рассматриваемой архитектуры СУ АФЭ возможно ее построение без использования сигнала угла отставания φ . При этом АФЭ будет восстанавли-

вать форму тока синфазно напряжению питающей сети. Следовательно, из сети в этом случае будет потребляться исключительно активная мощность, а реактивная, потребляемая УПП-АД, генерируется АФЭ. Гармонические искажения также компенсируются на уровне, соответствующем работе системы управления с формированием угла φ .

Однако такое управление требует завышения но-

минальной мощности инвертора фильтра, что приводит к дополнительным экономическим затратам. С другой стороны, это решение позволяет при неизменной мощности системы снизить мощность сетевого оборудования и полностью устранить потери, обусловленные потреблением реактивной энергии и искажением синусоидальной формы тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена модернизированная архитектура системы управления существующего АФЭ для устройств с ТПН, а именно введена обратная связь по углу запаздывания φ , позволяющая осуществлять компенсацию исключительно реактивной мощности высших гармоник тока, установлен регулятор напряжения в звене постоянного тока, что также приводит к снижению потребляемой активной мощности.

2. Произведен аналитический обзор процесса компенсации гармонических искажений с помощью АФЭ, а также рассмотрена методика подбора компонентов предлагаемого устройства.

3. Составлены математические модели систем «УПП-АД» и «АФЭ-УПП-АД», проведены их моделирование в процессе плавного пуска АД и сравнение полученных энергетических характеристик в MATLAB.

4. Оценены возможности применения АФЭ в системах с ТПН, выявлены пути получения положительного экономического эффекта, а именно увеличение срока службы и уменьшение номинальной мощности питающего оборудования.

Основными недостатками данного решения являются: необходимость установки дорогостоящего оборудования, дополнительные потери мощности в АФЭ. В связи с этим следует более детально оценить экономический эффект, получаемый при использовании АФЭ.

В дальнейшем необходимо исследовать функционирование АФЭ с возможностью коррекции несимметрии тока, оценить влияние его работы на гармонический состав питающего напряжения при искажении первой гармоники, провести изучение эффективности АФЭ в процессе торможения АД с помощью УПП и при работе ТПН в качестве экономайзера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.
2. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энерго-

- сберегающий асинхронный электропривод. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 256 с.
3. Швяковский А.В., Коваль А.С. Нечеткий регулятор тока в асинхронном электроприводе с параметрическим управлением // Студенческий вестник. Электронный научно-технический журнал. Октябрь 2005. URL: <http://e.biblio.bru.by/xmlui/bitstream/handle/1212121212/1068/99259469.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 13.04.2017).
 4. Москаленко В.В. Электрический привод. М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. 368 с.
 5. Петухов В.С., Соколов В.А. Повреждения трансформаторов и электродвигателей. Причина – в системе планового пуска // Новости электротехники. 2005. №2(32).
 6. Зюзев А.М., Степанюк Д.П., Бубнов М.В. Электромагнитная совместимость с сетью устройств плавного пуска асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 2 (544). С. 53–57.
 7. Зюзев А.М., Степанюк Д.П., Бубнов М.В. Применение ФКУ для улучшения электромагнитной совместимости с сетью устройств плавного пуска асинхронных двигателей // Электроприводы переменного тока: труды шестнадцатой международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. С. 83–88.
 8. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электропитания промпредприятий. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2010. 348 с.
 9. Кучумов Л. А., Кузнецов А.А., Червочков Д. Устройства плавного пуска электродвигателей. Неоднозначность протекающих процессов // Новости электротехники. 2014. №2(86).
 10. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Компенсация гармонических искажений и реактивной мощности в однофазных электрических сетях посредством параллельного активного фильтра энергии на базе релейного регулятора тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. №4. С. 54–57.
 11. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Применение параллельного активного фильтра электроэнергии для компенсации реактивной мощности и гармонических составляющих тока в трехфазных электрических сетях // Управление большими системами: Материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Липецк, 2012. С. 173–176.
 12. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Система управления параллельным активным фильтро-компенсирующим устройством на базе релейного регулятора тока в трехфазных электрических сетях // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. №2. С. 49–54.
 13. Мещеряков В.Н., Шеин М.А. Активная фильтрация высших гармонических составляющих тока в трехфазных электрических сетях // Вести высших учебных заведений черноморья. 2010. №1. С. 35–39.

Поступила в редакцию 18 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVICE FOR COMPENSATION OF HARMONIC DISTORTION OF CURRENTS IN SYSTEMS WITH A TYRISTOR VOLTAGE CONVERTER

Victor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Federal State-financed Educational Institution of Higher Learning «Lipetsk State Technical University», Lipetsk, Russia.

Alexei M. Evseev

Postgraduate Student, Federal State-financed Educational Institution of Higher Learning «Lipetsk State Technical University», Lipetsk, Russia.

For all time of application of controlled electric drive systems, which are based on semiconductor elements, thyristor converters proved to be the most reliable and cost-effective systems. Thyristor voltage converters (TVC) are used more often as soft starters for powerful asynchronous electric drives and are promising for use as systems with an economizer and also for the development of drive speed control devices. But unfortunately, the use of TVC leads to high harmonic distortions of the shape of the current consumed. The excessively consumed reactive power, DC consumption, current pulses lead to additional losses of electrical energy in the elements of the power-supply system, accelerate the aging of insulation of current-carrying parts of equipment and negatively affect its electromagnetic compatibility. And, if for soft starter with rare starts of the drive these effects can be neglected, then for a soft starter with frequent starts and systems where the TVC remains in the work after acceleration, they must be taken into account. This paper describes a solution aimed at compensating harmonic distortions of the consumable current in systems with a TVC. The main element of the proposed device is an active energy filter (AEF). It is based on IGBT-switches controlled by a relay current regulator (or a hysteresis regulator). The authors carried out an analytical overview of compensation process, the harmonic distortion of the current with AEF, considered its structure and selected components. The operation of a TVC with the compensation device was investigated by mathematical simulation in a MATLAB Simulink software. The paper presents the mathematical model, comparative energy characteristics and analysis of the harmonic composition of the current for TVC and TVC with AEF. The research group evaluated the possibilities and efficiency of application of the proposed device operating with the motor soft starter.

Keywords: Controlled electric drive, thyristor voltage converter, motor soft starter, economizer, harmonic distortion, losses of electric energy, compensation of harmonic distortion, active energy filter, relay current regulator, mathematical simulation, MATLAB Simulink, electrical grid.

REFERENCES

1. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniia elektroprivodov: uchebnik dlia studentov vysshikh uchebnykh zavedenii* [Control systems of electric drives: textbook for students of higher educational institutions]. Moscow, Akademia Publ., 2006. 304 p. (In Russian)
2. Braslavsky I. Ya., Ishmatov Z. Sh., Polyakov V. N. *Energoberegayushiy asikhroniy elektropriwod* [Energy saving induction electric drive]. Moscow, Akademia Publ., 2004. 256 p. (In Russian)
3. Shvayakov A.V., Koval A.S. Nechetkiy regulyator toka v asinhronnom elektroprihode s parametricheskim upravleniem. *Studencheskiy vestnik. Elektronnyy nauchno-tekhnicheskyy zhurnal* [Students Newsletter. Electronic scientific and technical journal], Oktyabr 2005, URL: <http://e.biblio.bru.by/xmlui/bitstream/handle/12121212/1068/99259469.pdf?sequence=1&i>
4. Moskalenko V.V. *Elektricheskiy privod* [Electric drive]. Moscow, Masterstvo: Vysshaya shkola Publ., 2000. 368 p. (In Russian)
5. Petukhov V.S., Sokolov V.A. Damage to transformers and electric motors caused by the motor soft starter. *Novosti elektrotehniki* [News of electrical engineering], 2005, no. 2(32). (In Russian)
6. Zyuzev A.M., Stepanyuk D.P., Bubnov M.V. Electromagnetic compatibility of induction motor soft starters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2016, no. 2 (544), pp. 53-57. (In Russian)
7. Zyuzev A.M., Stepanyuk D.P., Bubnov M.V. Application of passive filters for improvement of electromagnetic compatibility of network and induction motor soft starters. *Elektroprirodyi peremennogo toka: trudyi shestnadsyatoy mezhduarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [EPPT-2015], Ekaterinburg, 2015, pp. 83-88. (In Russian)
8. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatii 6th edition* [The Highest Harmonics in Systems of Power Supply of Industrial Enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2010. 348 p. (In Russian)
9. Kuchumov L. A., Kuznetsov A.A., Chervochkov D. Motors soft starters. Ambiguity of proceeding processes. *Novosti elektrotehniki* [News of electrical engineering], 2014, no. 2(86). (In Russian)
10. Meshcheryakov V.N., Habibullin M.M. Compensation of harmonic distortions and reactive power in single-phase electrical networks with a parallel active electric power filter managed by a current relay controller. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2013, no. 4, pp. 54-57. (In Russian)
11. Meshcheryakov V.N., Habibullin M.M. The use of a parallel active filter of the electric power industry for compensation of reactive power and harmonic current components in three-phase electrical networks. *Upravlenie bolshimi sistemami: Materialy IX Vserossiyskoy shkolyi-konferentsii molodykh uchenykh* [UBS-2012], Lipetsk, 2012, pp. 173-176. (In Russian)
12. Meshcheryakov V.N., Habibullin M.M. The control system of the parallel active filter-compensation device based on the current relay controller in three-phase electrical networks. *Elektrotehnicheskie komplekisy i sistemy upravleniya* [Electrotechnical complexes and control systems], 2012, no. 2, pp. 49-54. (In Russian)
13. Meshcheryakov V.N., Shein M.A. Active filtration of higher harmonics components in three-phase electric networks. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemya* [News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region], 2010, no. 1, pp. 35-39. (In Russian)

Мещеряков В.Н., Евсеев А.М. Устройство компенсации гармонических искажений тока в системах с тиристорным преобразователем напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-4-10)

Meshcheryakov V.N., Evseev A.M. Device For Compensation Of Harmonic Distortion Of Currents In Systems With A Thyristor Voltage Converter. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekisy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 4-10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-4-10)