

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСА ПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

Рассмотрена проблема искажения тока сети и большого энергопотребления подъемными кранами с частотно-регулируемым асинхронным электроприводом и промышленными комплексами подъемно-транспортного оборудования. Предложена технология повышения энергетических показателей энергоемкого электротехнического комплекса, характеризующих эффективность потребления и использования электроэнергии. Для повышения КПД за счет перераспределения энергии генераторного торможения между электроприводами и комплексами подъемных кранов выполнено подключение всех индивидуальных, для каждого асинхронного двигателя, автономных инверторов напряжения с входными *C*-фильтрами к общей выпрямительной подстанции, подобной типовой тяговой подстанции постоянного тока. В состав подстанции входит силовой преобразовательный трансформатор, диодный выпрямительный агрегат и выходной реактор. Для повышения коэффициента мощности силового трансформатора и сети применена коррекция входного тока диодного выпрямительного агрегата посредством активного фильтра тока сети. Кроме этого, предложен алгоритм и разработана система управления, позволяющие, сохраняя синусоидальность тока на входе выпрямительного агрегата, производить переключение транзисторного ШИМ коммутатора активного фильтра тока сети на транзисторный рекуператор по информации о знаке тока в звене постоянного напряжения и состоянию диодов выпрямительного агрегата. Приводятся результаты исследования в среде Matlab физических процессов выпрямительно-инверторного агрегата в составе электротехнического комплекса подъемно-транспортного оборудования.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, диодный выпрямительный агрегат, искажения тока сети, активный фильтр тока сети, рекуператор, потребление электроэнергии, комплекс подъемных кранов.

ВВЕДЕНИЕ

Современное подъемно-транспортное оборудование преимущественно оснащается асинхронным частотно-регулируемым электроприводом на основе преобразователей со звеном постоянного напряжения. Наибольшее практическое применение получили электроприводы, преобразователи частоты которых состоят из диодного выпрямителя с выходным *L*-фильтром и транзисторного автономного инвертора напряжения (АИН) с входным *C*-фильтром. Электропривод выполняется с динамическим торможением на балластное сопротивление, коммутируемое транзисторным ключом. При сравнительной простоте и низкой стоимости элементов силовой электроники существенными недостатками данной модификации электропривода являются искажения тока сети и потеря энергии на тормозных резисторах.

Для снижения искажений тока и рационального использования электрической энергии разработаны преобразователи частоты со звеном постоянного напряжения на основе транзисторного выпрямителя с двухсторонним обменом энергии с выходным *L*-фильтром и транзисторного автономного инвертора напряжения с входным *C*-фильтром. Электропривод этой модификации способен не только вернуть энергию генераторного торможения в систему электропитания, но и сформировать синусоидальные токи потребления и рекуперацию с регулировкой фазой тока и управляемым коэффициентом мощности сети [1]. К недостатку этой модификации электропривода следует отнести большую стоимость двухкомплектного транзисторного преобразователя применительно к каждому двигателю.

Для группы асинхронных двигателей с частотным регулированием рациональное использование энергии генераторного торможения обеспечивают подключением всех автономных инверторов к общим шинам постоянного напряжения, через которые производится обмен энергией между двигателями. Например, в тяговой сети городского и железнодорожного электрифицированного транспорта снижение тока потребления происходит за счет использования энергии, вырабатываемой при генераторном торможении двигателями встречного подвижного состава [2]. Когда вырабатываемой электроприводами энергии становится больше, чем потребляемой, то целесообразно использовать транзисторный выпрямитель в режиме рекуператора для возврата энергии в питающую сеть. Такое техническое решение предназначено для грузоподъемных механизмов [3].

Результаты исследования систем электроснабжения отдельных предприятий, например тепловой электростанции [4] и горно-обогатительной фабрики [5], подтверждают актуальность мероприятий, направленных на повышение качества электрической энергии в электрических сетях при использовании частотно-регулируемого электропривода. Кроме этого, обширное исследование Российских электрических сетей на соответствие нормам показателей качества электрической энергии показало, что проблема несинусоидальности напряжения и тока характерна для всех регионов Российской Федерации [6].

Для улучшения синусоидальности тока [7-10] применяют пассивные резонансные фильтры, многопульсные схемы выпрямления и активные фильтры. Наиболее перспективным направлением является снижение искажений тока при помощи параллельного активного фильтра тока сети, который представляет собой управляемый источник тока, который генерирует в точке присоединения требуемый ток компенсации.

Для снижения искажений тока в сети и рационального использования энергии генераторного торможения рассматривается схемное решение для комплекса подъемно-транспортного оборудования с частотно-регулируемыми АД. В нем используется общий диодный выпрямитель для питания группы АИН с параллельным активным фильтром на входе выпрямителя. Для рекуперации избыточной энергии генераторного торможения асинхронных машин применен транзисторный выпрямитель с ШИМ в режиме инвертора, ведомого сетью (рекуператор).

Силовые схемы активного фильтра и рекуператора идентичны и состоят из мостового транзисторного коммутатора, индуктивности трехфазного тока и конденсатора постоянного напряжения. Отличие состоит в системах управления.

Разработанная модифицированная система управления по знаку тока в звене постоянного напряжения и состоянию диодов выпрямителя осуществляет перевод транзисторного коммутатора из режима активного фильтра в режим рекуператора, обеспечивая в том и другом случае синусоидальный ток на входе преобразователя.

Целью работы является исследование на блочно-модульной модели физических процессов энергоемкого электротехнического комплекса, получающего питание от сети переменного напряжения через подстанцию с силовым трансформатором, диодным выпрямительным агрегатом и выходным реактором, оснащенную транзисторным преобразователем с возможностью работы как активным фильтром тока сети, так и рекуператором. Для достижения поставленной цели разработана имитационная модель комплекса, где диодный выпрямитель и транзисторный преобразователь образуют выпрямительно-инверторный агрегат, для которого применена специально разработанная модель системы управления [11].

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО АГРЕГАТА

Выпрямительно-инверторный агрегат предназначен для питания группы асинхронных двигателей с частотным регулированием, подключенных через автономные инверторы напряжения к общему звену (шинам) постоянного напряжения. Структурная схема преобразователя изображена на **рис. 1**.

Питание устройства осуществляется от трехфазного силового трансформатора ТС. Электроприводы на базе автономного инвертора напряжения АИН и асинхронного электродвигателя АД, подключаются к шинам постоянного напряжения.

Различаются два режима работы агрегата – выпрямительный и инверторный. В выпрямительном режиме электроприводы питаются от трехфазного выпрямителя Д с встроенным LC-фильтром и низким уровнем пульсаций выпрямленного напряжения, при этом трехфазный коммутатор K_1 замкнут, шунтируя индуктивность L_2 , а ключ K_2 разомкнут и мостовой транзисторный коммутатор Т, совместно с индуктивностью L_1 и конденсатором C_1 , работает как активный фильтр тока, обеспечивая низкий уровень искажений, вносимых выпрямителем в питающую сеть.

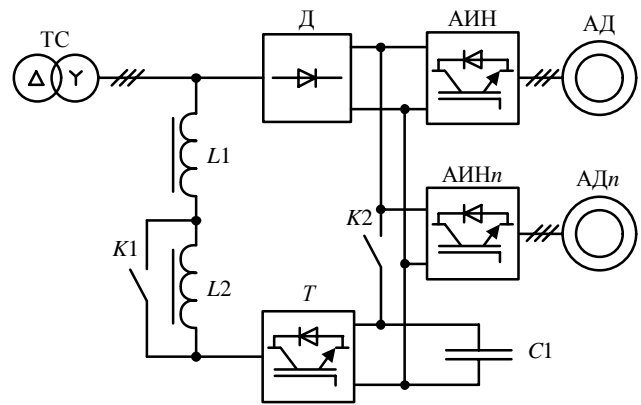


Рис. 1. Структурная схема выпрямительно-инверторного агрегата с общим звеном постоянного напряжения для группы асинхронных двигателей с индивидуальными автономными инверторами напряжения:
 ТС – трансформатор силовой; Д – диодный выпрямитель; АИН-АИНn – индивидуальные автономные инверторы напряжения; для группы асинхронных двигателей АД-АДn; L_1 – трехфазная индуктивность; L_2 – трехфазная индуктивность; K_1 – трехфазный коммутатор; Т – транзисторный коммутатор; C_1 – конденсатор коммутатора; K_2 – ключ

В то время, когда электроприводами, подключенными к шинам, генерируется электрическая энергия, она потребляется другими электроприводами, работающими в двигательном режиме, и ток, потребляемый трехфазным выпрямителем, снижается. Когда генерируемой энергии становится больше, чем потребляемой, напряжение в промежуточном звене преобразователя повышается и, являясь обратным для диодов выпрямителя, закрывает их. Одновременно с этим система управления переключает преобразователь в инверторный режим. При этом коммутатор K_1 размыкается, а ключ K_2 замыкается, и энергия из сети постоянного напряжения поступает на транзисторный коммутатор, который совместно с индуктивностью, образованной элементами L_1 и L_2 , работает как ведомый сетью инвертор, обеспечивая возврат энергии из промежуточного звена постоянного напряжения в сеть. Конденсатор C_1 совместно с конденсаторами входных С-фильтров АИН кратковременно выполняет функцию накопителя рекуперированной в сеть энергии. Система управления выпрямительно-инверторного агрегата при помощи соответствующих датчиков получает информацию о мгновенных значениях тока и напряжения и вырабатывает сигналы управления для транзисторов коммутатора. Она также производит необходимые переключения ключей K_1 и K_2 .

Следует отметить важную особенность построения преобразователя применительно к энергоемкому электротехническому комплексу. Она заключается в том, что основной поток нерегулируемой активной мощности, потребляемой энергоемким электротехническим комплексом, проводит диодный выпрямитель, а регулированию подлежит только часть активной мощности сети. При потреблении энергии из сети она регулируется активным фильтром тока сети и необходима для создания антиискажений тока для выпрямителя и реактивной мощности для силового трансформатора, а при рекуперации энергии в сеть только для компенсации реактивной мощности силового трансформатора.

Синхронизированная с сетью система управления выпрямительно-инверторным агрегатом при помощи соответствующих датчиков получает информацию о мгновенных значениях тока и напряжения и вырабатывает управляющие импульсы для транзисторов коммутатора и сигналы управления для переключений ключей K_1 и K_2 , как для режима активного фильтра, так и для режима инвертора, ведомого сетью (рекуператора). Системы управления современных параллельных активных фильтров тока базируются на теории мгновенной мощности [12-14]. Она основана на определении мгновенной мощности во временной области. При этом отсутствуют ограничения на форму тока и напряжения, поэтому такой подход применим для рассмотрения процессов как в установившихся, так и переходных режимах. Для управления транзисторным выпрямителем системы управления строятся на преобразовании координат методом результирующего вектора напряжения и тока [15-17]. При этом часть математических преобразований одинакова для систем управления обоих устройств.

Сигналы управления для транзисторного коммутатора формируются широтно-импульсным модулятором из трехфазной системы координат I'_a , I'_b и I'_c , полученной из системы неподвижных координат I_a и I_b обратным преобразованием Кларка:

$$\begin{bmatrix} I'_a \\ I'_b \\ I'_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Координаты I'_a и I'_b вычисляются в зависимости от режима работы устройства.

Выпрямительный режим. Фазное напряжение трехфазной сети (U_a , U_b и U_c) преобразовывается в систему неподвижных координат U_a и U_b прямым преобразованием Кларка:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Аналогичным образом система трехфазного тока нагрузки (I_a , I_b и I_c) преобразуется в систему координат I_a и I_b :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

По найденным величинам U_a , U_b и I_a , I_b производится вычисление мгновенной реальной p и мнимой q мощности согласно выражениям:

$$p = U_a I_a + U_b I_b; \quad (4)$$

$$q = U_b I_a - U_a I_b. \quad (5)$$

После того как выделены реальная и мнимая мощности, возможны два алгоритма построения системы компенсации. При первом алгоритме с помощью соответствующих фильтров нижних частот выделяется часть реальной p и мнимой q мощности нагрузки, которая должна быть скомпенсирована. Далее рассчитываются токи I'_a и I'_b :

$$\begin{bmatrix} I'_a \\ I'_b \end{bmatrix} = \frac{1}{U_a^2 + U_b^2} \begin{bmatrix} U_a & U_b \\ U_a & -U_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}, \quad (6)$$

на основании которых по выражению (1) вычисляются координаты I'_a , I'_b и I'_c , из которых при помощи широтно-импульсного модулятора формируются сигналы управления для транзисторного коммутатора.

При втором алгоритме выделяются части реальной p и мнимой q мощностей нагрузки, которые не должны быть скомпенсированы. Затем аналогичным образом по выражениям (6) и (1) находят координаты I'_a , I'_b и I'_c для формирования сигналов управления транзисторами коммутатора, который работает как активный фильтр тока.

Инверторный режим. В этом режиме система управления осуществляет стабилизацию напряжения на шинах постоянного напряжения и раздельное управление по проекциям реактивного I_y и активного I_x тока сети. Стабилизация напряжения осуществляется регулированием величины вектора I_x , PI-регулятором в соответствии с заданным значением и величиной напряжения на шинах постоянного напряжения. Транзисторный коммутатор не потребляет реактивной мощности при величине тока I_y равным нулю, для управления коэффициентом мощности сети координатой задается опережающий или отстающий реактивный ток. Координаты I_y и I_x преобразуются в систему неподвижных координат I'_a и I'_b в соответствии с уравнениями:

$$I'_a = I_x \cos(\omega_k t) - I_y \sin(\omega_k t); \quad (7)$$

$$I'_b = I_y \cos(\omega_k t) + I_x \sin(\omega_k t), \quad (8)$$

где ω_k – скорость вращения вектора относительно неподвижных координат.

Затем по выражению (1) находят координаты I'_a , I'_b и I'_c , и далее при помощи широтно-импульсного модулятора формируют сигналы управления транзисторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На основе математической модели системы управления, в среде имитационного моделирования *Simulink* пакета *Matlab* построена модель электротехнического комплекса с выпрямительно-инверторным агрегатом. Осциллограммы токов в контрольных точках модели изображены на **рис. 2**.

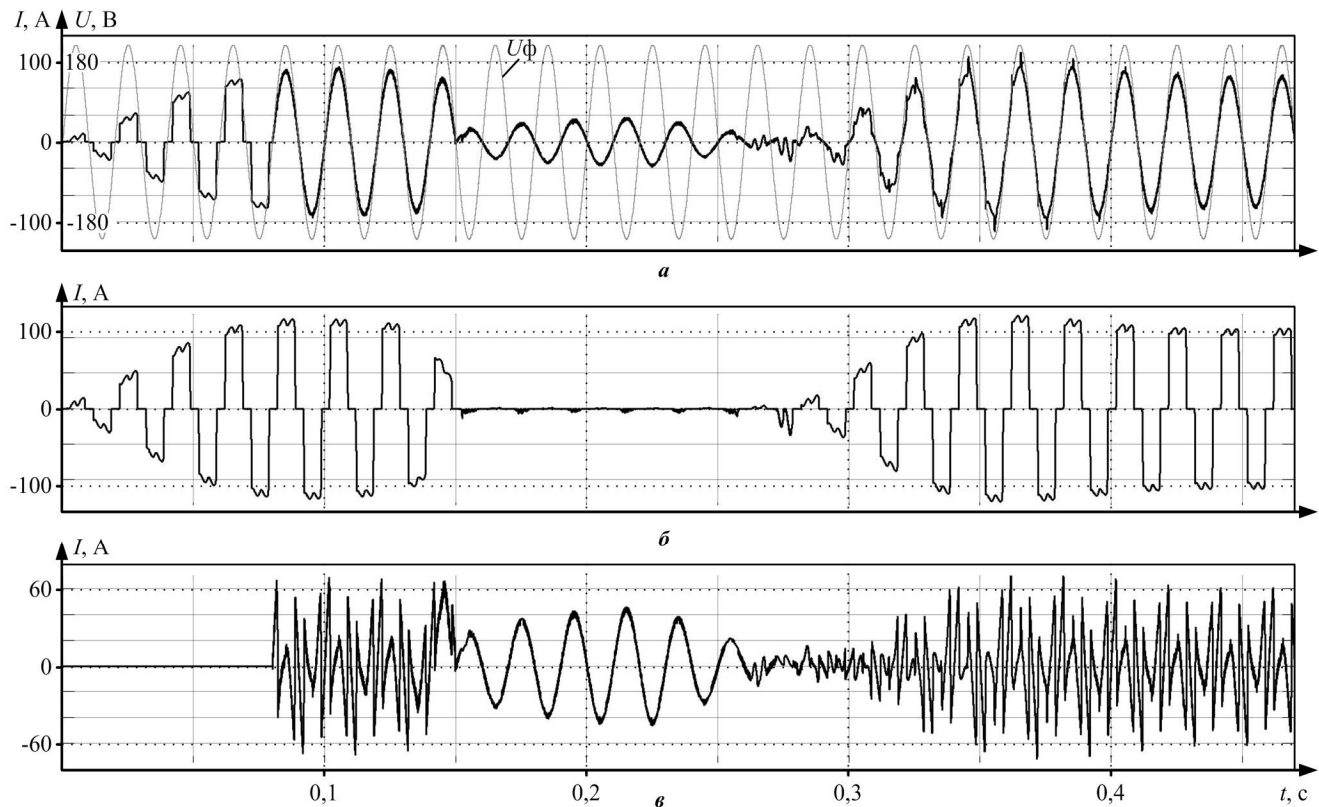


Рис. 2. Осциллограммы: а – фазное напряжения и ток сети; б – ток на входе диодного выпрямителя; в – ток на выходе транзисторного коммутатора

На первом интервале (от 0 до 0,08 с) общее для всех инверторов звено постоянного напряжения получает питание от диодного выпрямителя, при этом закрыты транзисторы коммутатора активного фильтра тока сети и компенсация искажений тока не производится. На втором интервале (от 0,08 до 0,12 с) производится включение активного фильтра тока сети. Он генерирует антиискажения (рис. 2, в), и суммарный ток сети (рис. 2, а) преобразуется в синусоидальный. На третьем интервале (от 0,12 до 0,25 с) имитируется генераторный режим торможения частотно-регулируемого электропривода, вызывающий рост напряжения на конденсаторе звена постоянного напряжения, которым выключаются диоды выпрямителя.

Выпрямительно-инверторный агрегат переключается в инверторный режим и транзисторный коммутатор с синхронизированной сетью системой управления преобразует постоянный ток в трехфазную систему синусоидальных токов, которые по отношению к напряжению сети находятся в противофазе, но с регулируемым опережающим емкостным характером для компенсации реактивной мощности силового трансформатора. На четвертом интервале (от 0,25 с) система управления снова переключается в выпрямительный режим.

Осциллограммы коэффициентов, характеризующих качество тока сети и эффективность потребления

электроэнергии, полученные при помощи специализированного модуля для исследования энергетических показателей электротехнических устройств [18], изображены на рис. 3.

Искажения тока сети наблюдаются при отключенном транзисторном коммутаторе на первом интервале и при прямом и обратном переключении выпрямительного и инверторного режимов работы устройства. В установившемся режиме коэффициент искажений тока стремится к единице, что свидетельствует о минимальном уровне искажений.

Величина коэффициента мощности в установившихся режимах также близка к единице. Гармонический состав тока питающей сети в разных режимах работы преобразователя, полученный при помощи «Powergui FFT Analysis Tool», приведен в таблице. На первом интервале, при питании электроприводов от выпрямителя с выключенным транзисторным коммутатором наблюдается значительная величина суммарного коэффициента гармонических искажений тока питающей сети (THD), а также гармоник пятого и седьмого порядка. При включении транзисторного коммутатора на втором и четвертом интервалах и при работе устройства в инверторном режиме на третьем интервале величина искажений тока снижается до нормативных значений [19, 20].

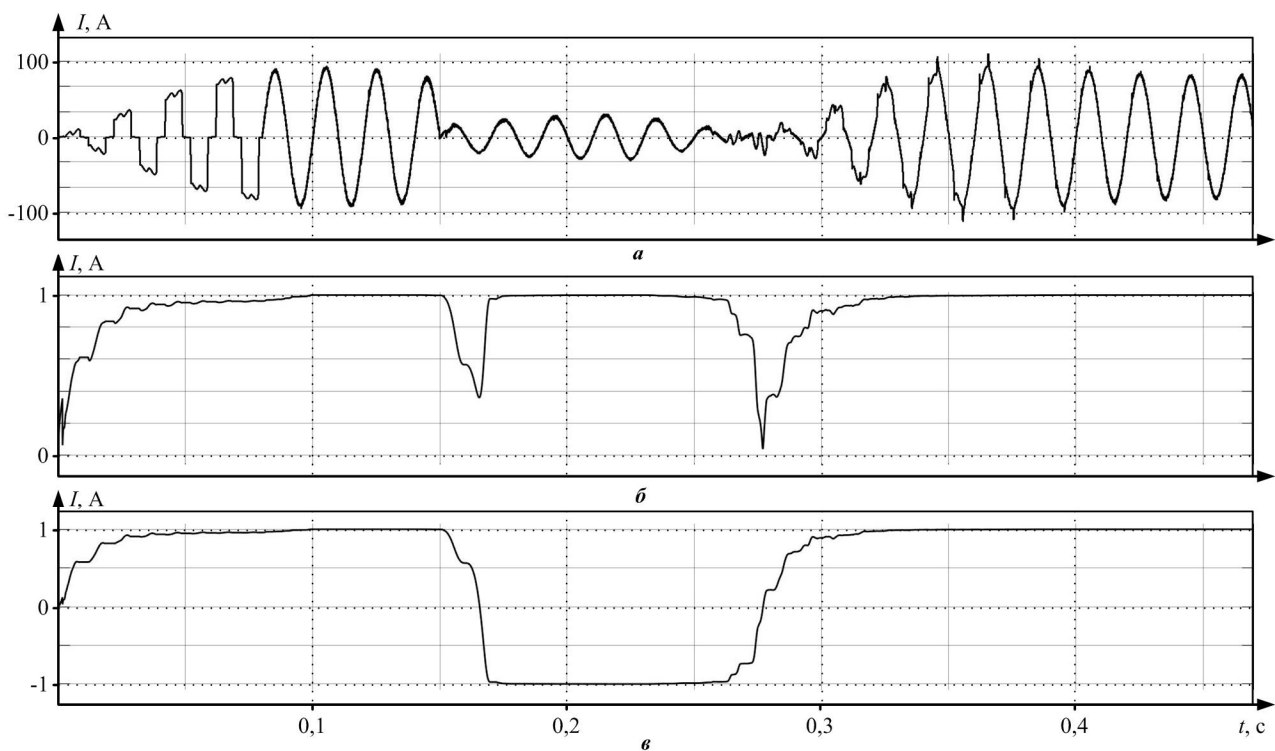


Рис. 3. Характеристики сети: *а* – фазный ток; *б* – коэффициент искажения тока; *в* – коэффициент мощности

Величина гармонических составляющих тока питающей сети для различных режимов работы преобразователя

Гармонические составляющие тока	Номер интервала			
	1	2	3	4
THD	28,2	2,2	3,3	2,4
50 Гц (h1)	100	100	100	100
100 Гц (h2)	1,5	0,2	1,1	0,1
150 Гц (h3)	0,8	0,1	0,5	0,0
200 Гц (h4)	0,7	0,0	0,2	0,1
250 Гц (h5)	20,6	0,3	0,2	0,4
300 Гц (h6)	0,1	0,0	0,2	0,0
350 Гц (h7)	13,2	0,4	0,1	0,4
400 Гц (h8)	0,4	0,0	0,2	0,0
450 Гц (h9)	0,3	0,1	0,2	0,1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов исследования физических процессов в выпрямительно-инверторном агрегате в составе комплекса подъемных кранов позволил сделать следующие выводы:

1. Численными экспериментами в среде *Matlab* показана возможность прямого и обратного переключения алгоритма работы транзисторного коммутатора у активного фильтра тока сети на рекуператор без всплесков токов и просадок напряжения в сети.
2. Перераспределение энергии генераторного торможения асинхронных двигателей у отдельных механизмов подъемных кранов через инверторы и шины постоянного напряжения между остальными АД энергоемкого комплекса снижает потребление энергии из сети через общий выпрямитель.
3. Подключение к входным зажимам выпрямителя активного фильтра тока сети, устраняющего искажением тока и реактивную мощность силового транс-

форматора, снижает потери в силовом трансформаторе и в сети.

4. Переключение транзисторного коммутатора активного фильтра тока сети в режим рекуператора обеспечивает возврат избыточной энергии генераторного торможения в сеть. При этом диоды выпрямителя заперты обратным напряжением конденсатора *LC*-фильтра, а транзисторный рекуператор создает синусоидальный опережающий ток во вторичной цепи силового трансформатора с компенсацией его реактивной мощности.

5. Выпрямительно-инверторный агрегат устраняет искажения тока сети как при потреблении энергии электротехническим комплексом, так и рекуперации ее в сеть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление качеством электроэнергии слабых сетей посредством активного выпрямителя напряжения / А.С. Плехов, Д.Ю. Титов, Ю.В. Шевырев и др. // Интеллектуальная электротехника. 2018. №1. С. 101–111.
2. Гречишников В.А., Шаламай И.В., Власов С.П. Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выравнивания напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока // Электротехника. 2017. №9. С. 46–48.
3. Пат. 142676 Российская Федерация, МПК В66С 13/22 (2006.01). Система частотно-регулируемых электроприводов для комплекса грузоподъемных кранов / Климаш В.С., Соколовский М.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский на Амуре государственный технический университет». №2013145059; заявл. 08.10.2013; опубл. 27.06.2014, Бюл. №18.
4. Медведев В.Н. Электромагнитная совместимость высоковольтных преобразователей частоты с сетями электроснабжения тепловых предприятий // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. №2. С. 22–29.
5. Харитонов Я.С., Бебихов Ю.В., Егоров А.Н. Сопоставление и анализ результатов контроля качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. №4. С. 54–59.

6. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л.И. Ковверникова, В.В. Суднова, Р.Г. Шамонов и др.; под общей редакцией Н.И. Воробей. Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.
7. Aldousari B.F. Power system harmonics // *Int. Journal of Engineering Research and Application*. 2016. Vol. 6, no. 10, pp. 55–61.
8. Harshitha G.B. Simulation studies on autotransformer rectifier unit for aircraft applications // *International Journal of Electrical Engineering & Technology (IJEET)*. 2018. Vol. 9, no. 5, pp. 1–11.
9. Gamit K., Chaudhari K. Multi pulse rectifier using different phase shifting transformers and its THD comparison for power quality issues // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016. Vol. 3, no. 1, pp. 1025–1033.
10. Akagi H. New trends in active filters for power conditioning // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1996. Vol. 32, no. 6, pp. 1312–1322.
11. Пат. 2713493 Российская Федерация, МПК H02J 5/00 (2006.01). Выпрямитель с активным фильтром / Климаш В.С., Соколовский М.А., Петухов А.В.; заявитель и патентообладатель Климаш В.С., Соколовский М.А. №2019127420; заявл. 25.03.2019; опубл. 05.02.2020, Бюл. №4.
12. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters // *Bulletin of The Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2006. Vol. 54, no. 3, pp. 255–269.
13. Sharma U., Kharbanda S. Instantaneous reactive power theory active power line conditioner // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 4, no. 5, pp. 3302–3305.
14. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink. Урок 16. Исследование электрической цепи с трехфазным активным фильтром // *Силовая электроника*. 2013. №1. С. 80–86.
15. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / под общ. ред. Р.Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.
16. Новожилов М.А., Пионкевич В.А. Разработка и исследование математических моделей трехфазных мостовых выпрямителей и инверторов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. №3. С. 553–574.
17. Герман-Галкин С.Г. Моделирование устройств силовой электроники. Урок 10. Вторичный источник питания полупроводникового электропривода с рекуперацией энергии в сеть // *Силовая электроника*. 2009. №4. С. 102–107.
18. Климаш В.С., Климаш В.С., Власевский С.В. Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде Matlab // *Электротехнические системы и комплексы*. №3(36). С. 11–16.
19. ГОСТ 30804.3.12-2013 (IEC 61000-3-12:2004). Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы, гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электропитания. Нормы и методы испытаний. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 28 с.
20. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. Approved 27.03.2014. IEEE-SA Standards Board. 2014. 17 p.

Поступила в редакцию 18 января 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A LIFTING CRANE COMPLEX

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Engineering), Professor, the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: klimash@yandex.ru.

Mikhail A. Sokolovskii

Postgraduate student, the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: Socel@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7311-5584>.

The problem of network current distortion and high power consumption by lifting valves with frequency-controlled asynchronous electric drive and industrial complexes of lifting and transport equipment is considered. The technology of increasing energy indices of the energy-intensive electrical complex characterizing efficiency of electric power consumption and use is proposed. In order to increase the efficiency due to redistribution of energy of generator braking between electric drives and the complex of lifting cranes are all individual, for each asynchronous motor, independent voltage inverters with input C-filters are connected to common rectifying substation similar to standard DC traction substation. A substation consists of a power converter transformer, a diode rectifier unit and an output reactor. To increase the power factor of the power transformer and network, correction of input current of diode rectifier unit is applied by means of an active filter of network current. In addition, an algorithm is proposed and a control system is developed, which makes it possible to maintain sinusoidality of current at the input of the rectifier unit, to switch the transistor PWM of the switch of the active current filter of the network to the transistor recuperator according to the information

on the sign of current in the DC voltage link and the state of diodes of the rectifier unit. The results of research in Matlab environment of physical processes of rectifier-inverter unit as part of electrical complex of lifting and transportation equipment are given.

Keywords: frequency-controlled electric drive, diode rectifier unit, network current distortions, active network current filter, recuperator, electric power consumption, complex of lifting cranes.

REFERENCES

1. Plekhov A.S., Titov D.Yu., Shevryev Yu.V., et al. Power quality management of weakness networks by active voltage rectifier. *Intellektualnaya Elektrotehnika* [Smart electrical engineering], 2018, no. 1, pp. 101–111. (In Russian)
2. Grechishnikov V.A., Shalamai I.V., Vlasov S.P. Energy loss saving in the electric-traction network due to voltage grading in the buses of DC traction substation. *Elektrotehnika* [Electrical equipment], 2017, no. 9, pp. 46–48. (In Russian)
3. Klimash V.S., Sokolovskii M.A. *Sistema chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov dlya kompleksa gruzopodzemnykh*

- kranov [System of frequency-controlled electric drives for complex of lifting cranes]. Patent RF, no. 142676, 2014.
4. Medvedev V.N. Electromagnetic compatibility of high-voltage frequency converters with power plant networks. *Elektrotehnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, no. 2, pp. 22–29. (In Russian)
5. Kharitonov Ya.S., Bebikhov Yu.V., Egorov A.N. Analysis of quality control in power supply systems of mining enterprises. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2019, no. 4, pp. 54–59. (In Russian).
6. Kovernikova L.I., Sudnova V.V., Shamonov R.G. et al. *Kachestvo elektricheskoi energii: sovremennoe sostoyanie, problemy i predlozheniya po ikh resheniyu* [Quality of electric energy: current state, problems and proposals to solve them]. Novosibirsk, Nauka, 2017. (In Russian)
7. Aldousari B.F. Power system harmonics. *Int. Journal of Engineering Research and Application*. 2016, no. 6(10), pp. 55–61.
8. Harshitha G.B. Simulation studies on autotransformer rectifier unit for aircraft applications. *International Journal of Electrical Engineering & Technology (IJEET)*. 2018, no. 9(5), pp. 1–11.
9. Gamit K., Chaudhari K. Multi pulse rectifier using different phase shifting transformers and its THD comparison for power quality issues. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016, no. 3(1), pp. 1025–1033.
10. Akagi H. New trends in active filters for power conditioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1996, no. 32(6), pp. 1312–1322.
11. Klimash V.S., Sokolovskii M.A., Petukhov A.V. *Vypriamitel s aktivnym filtrom* [Rectifier with active filter]. Patent RF, no. 2713493, 2020.
12. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters. *Bulletin of The Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2006, no. 54(3), pp. 255–269.
13. Sharma U., Kharbanda S. Instantaneous reactive power theory active power line conditioner. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017, no. 4(5), pp. 3302–3305.
14. German-Galkin S.G. Virtual laboratories of power electronics devices in Matlab-Simulink. Lesson 16. Investigation of an electric circuit with a three-phase active filter. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 2013, no. 1, pp. 80–86. (In Russian)
15. Efimov A.A., Shreiner R.T.; Shreiner R.T., editors. *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemyykh elektroprivodakh peremennogo toka* [Active converters in adjustable AC electric drives]. Novouralsk, NGTI, 2001. (In Russian)
16. Novozhilov M.A., Pionkevich V.A. Development and study of mathematical models of three-phase bridge rectifiers and inverters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2019, no. 23(3), pp. 553–574. (In Russian). doi: 10.21285/1814-3520-2019-3-553-574
17. German-Galkin S.G. Simulation of power electronics devices. Lesson 10. Secondary power source of a semiconductor electric drive with regeneration of energy into the network. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 2009, no. 4, pp. 102–107. (In Russian)
18. Klimash S.V., Klimash V.S., Vlasayevsky S.V. Specialized modules for calculation of energy coefficients of electrical engineering devices in Matlab. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2017, no. 3(36), pp. 11–16. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16
19. GOST 30804.3.12-2013 (IEC 61000-3-12:2004). Electromagnetic compatibility of equipment. Rates of current harmonic components caused by equipment with current consumption of more than 16 A but no more than 75 A (in a single phase) switched to low voltage distribution power-supply systems. Rates and testing methods. Moscow, Standartinform, 2014. 28 p. (In Russian)
20. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. Approved 27.03.2014. IEEE-SA Standards Board. 2014. 17 p.

Климаш В.С., Соколовский М.А. Повышение энергетической эффективности комплекса подъемных кранов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1(46). С. 34–40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-34-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-34-40)

Klimash V.S., Sokolovskii M.A. Improving the Energy Efficiency of a Lifting Crane Complex. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 34–40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-34-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-34-40)