НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА

НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Электромагнитная совместимость коллекторного электропривода с трехфазной сетью переменного тока

08, август 2012

DOI: 10.7463/0812.0450268

Резников С. Б., Бочаров В. В., Корнилов А. Б.

УДК 621.313.36

Россия, Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)
ab_kornilov@mail.ru

Введение и постановка задачи

Наиболее широко распространенной структурой системы импульсного питания коллекторного электропривода от трехфазной сети переменного тока является структура с выпрямителем (диодным или тиристорным), промежуточным электролитическим фильтром (емкостным или аккумуляторным) и импульсным модулятором – конвертором на базе транзисторов или запираемых (двухоперационных) тиристоров. В частности, при участии авторов, рассматривались различные структуры системы питания железнодорожных тяговых коллекторных электродвигателей от контактных высоковольтных сетей постоянного (3 кВ) и переменного (25 кВ) тока [1].

Перспективные структуры тягового электропривода обычно предусматривают цепи не только для динамического торможения (с тепловым рассеиванием энергии), но и рекуперативного торможения с возвратом энергии в промежуточный буферный фильтр или в питающую сеть. Это обстоятельство существенно усложняет структуру системы питания, но повышает его энергоэкономичность.

Следует однако констатировать, что вопросу коррекции коэффициента мощности, потребляемой из сети переменного тока, даже в перспективных структурах систем электропитания тягового электропривода практически не уделено внимание ни в отечественной, ни в зарубежной литературе. Для обеспечения максимального энергосбережения и сохранения качества электроэнергии (формы напряжения) питающей промышленной или автономной сети все вторичные преобразователи

с входными выпрямителями должны содержать в их цепях так называемые активные корректоры коэффициента мощности (ККМ или PFC). В их задачи входит обеспечение не только синусоидальной формы потребляемого тока, но и его синфазности (нулевого фазового сдвига) с сетевым напряжением.

Классические ККМ, применяемые практически во всех современных вторичных источниках питания (ВИП) представляют собой повышающий импульсный модулятор на выходе выпрямителя и промежуточный буферный электролитический конденсатор с относительно большой энергоемкостью, особенно при питании от однофазной сети.

Самая серьезная проблема возникает при наружном применении ККМ, например в диапазоне температур от -40…60 ˚С до 105…120 ˚С (вблизи разогретой конструкции). Импеданс и допустимый ток пульсаций у силового фильтрующего электролитического конденсатора ухудшаются при температуре -40 ˚С в 12-13 раз. Кроме того, “холодный” запуск приводит к резкому снижению ресурса работы конденсатора. При повышенных температурах появляется необходимость применения специальных электролитических конденсаторов с гарантированным пределом в 105 ˚С (и более), срок службы которых существенно снижен, а цена завышена.

В связи с вышеуказанным представляется целесообразным рассмотрение принципиально новых схемотехнических решений без энергоемких электролитических конденсаторов.

1. Компромиссное решение с ослабленным промежуточным емкостным фильтром

В системах импульсного питания коллекторного электропривода от трехфазной (или многофазной) сети переменного тока, где низкочастотные пульсации выпрямленного напряжения практически допустимы без энергоемкой фильтрации, указанная проблема существенно ослаблена и позволяет заменить электролитические конденсаторы на пленочные или бумажные (гораздо менее энергоемкие, но термостойкие и надежные). В этих случаях целесообразно применить известные схемы ККМ, например схему на базе Виенна – выпрямителя [2] и другие [3]. Однако при этом не решается задача обеспечения двунаправленности передаваемой энергии.

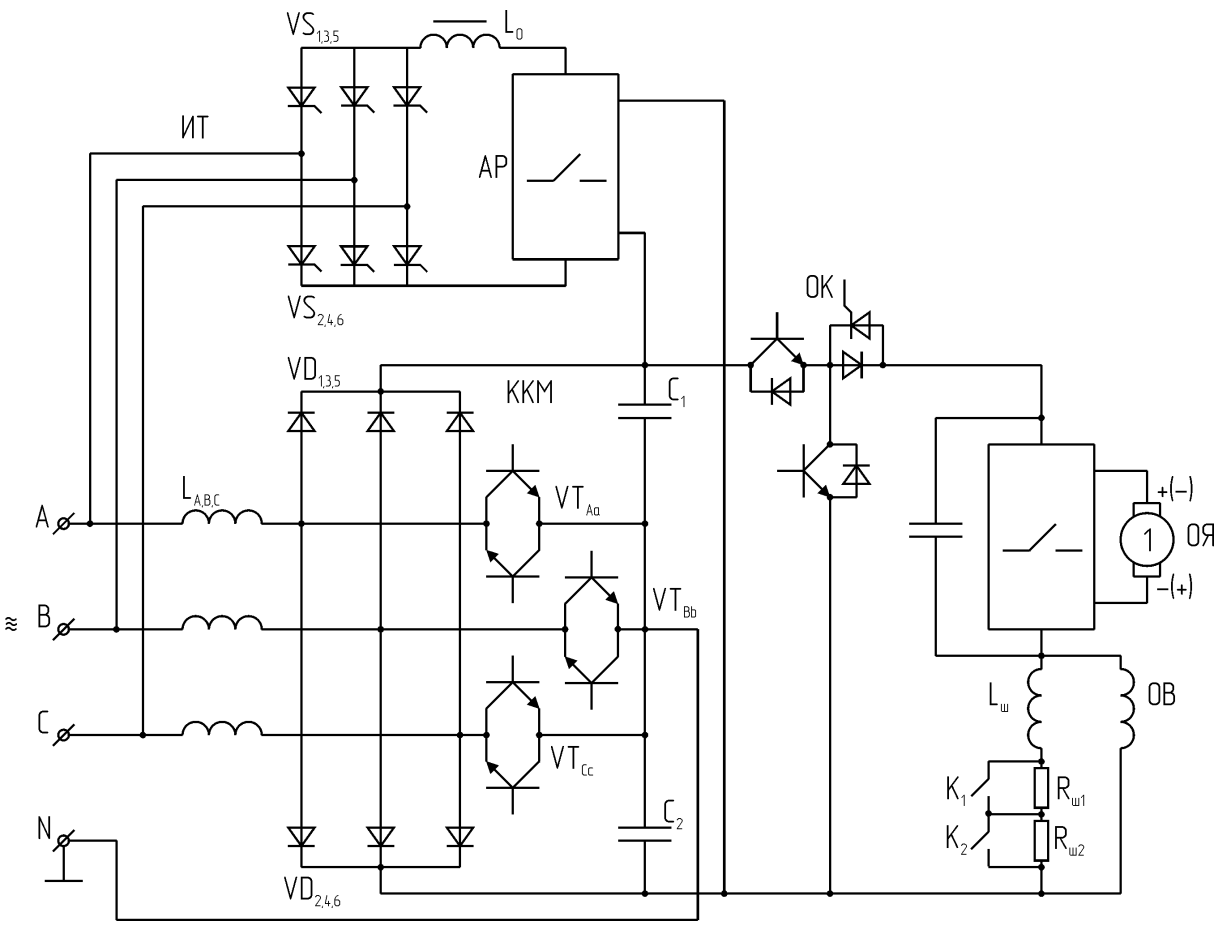

Рис. 1. Система импульсного питания электропривода на базе трехфазного корректора коэффициента мощности (ККМ по схеме Виенна-выпрямителя) и цепи рекуперации энергии через инвертор тока (ИТ) и обратимый конвертор (ОК)

Учитывая также проблему обеспечения рекуперативного торможения в широком скоростном диапазоне, можно предложить схемотехнический вариант системы импульсного питания электропривода на базе трехфазного ККМ по схеме Виенна - выпрямителя и цепи рекуперации энергии через инвертор тока (ИТ) и обратимый конвертор (ОК), показанный на рис. 1. Система содержит: балластные дроссели ($L_{A,B,C}$ и L_0), корректор коэффициента мощности (ККМ) с мостовым выпрямителем (VD_{1-6}), модулирующими транзисторными ключами переменного тока ($VT_{Aa,Bb,Cc}$) и конденсаторным фильтром ($C_{1,2}$) с заземленной средней точкой, импульсный обратимый конвертор (ОК) с модулирующими транзисторными ключами ($VT_{1,2}$) для прямого (понижающего) и обратного (повышающего) преобразований и фильтрующим конденсатором (C_3), а также два контакторных реверсора - аварийный (АР) для перевода инвертора тока в режим управляемого выпрямителя и якорный (ЯР) для

реверса электродвигателя постоянного тока с обмотками якоря (ОЯ) и обмоткой возбуждения (ОВ), зашунтированной индуктивно-активным шунтом ($L_ш$-$R_{ш1,2}$)с контакторами ($К_{1,2}$).

К достоинствам данной схемы импульсного питания коллекторного электропривода от сети переменного тока помимо двух основных - обеспечение коррекции коэффициента потребляемой мощности и режима рекуперативного торможения, причем без энергоемкого, нетермостойкого и ненадежного промежуточного электролитического фильтра – можно также отнести следующие три:

1) режим динамического торможения (с тепловым рассеиванием энергии), применяемый обычно при низких скоростях, может быть с успехом исключен благодаря широкому скоростному диапазону режима рекуперативного торможения (с помощью повышающего обратного преобразования ОК);

2) наличие звена выпрямленного стабилизированного повышенного напряжения с емкостным буфером позволяет использовать комбинированную систему распределения переменного и постоянного тока для оптимизации количества и энергоэкономичности преобразователей энергии;

3) в системе обеспечивается резервное («горячий резерв») питание электропривода в случае отказа ККМ, причем с сохранением режима рекуперативного торможения, т.е существенно повышается функциональная надежность.

К наиболее существенным недостаткам рассмотренной структуры можно отнести следующие:

1) последовательное двухкаскадное преобразование энергии (сниженный КПД);

2) наличие цепи для «сквозного сверхтока» при несанкционированном одновременном включении двух транзистров ОК (VT_1 и VT_2), например при воздействии помех или пробое одного из транзистров;

3) потенциальная возможность режима автоколебаний при наличии цепей отрицательной обратной связи в управляющем канале импульсной стабилизации выпрямленного напряжения на конденсаторном фильтре ($C_{1,2}$), требующая исследований на устойчивость;

4) недостаточно высокая верхняя граница скоростного диапазона для рекуперативного торможения может потребовать для ее повышения изменения схемы обратного питания ОК (для реализации понижающего режима) или вмешательства в схему возбуждения (для частичного развозбуждения при большой скорости);

5) практическая неприменимость схемы для наружного использования при питании от однофазной сети переменного тока из-за необходимости установки в этом случае энергоемкого нетермостойкого и ненадежного электролитического емкостного фильтра ($C_{1,2}$).

2. Принципиально новое решение

Исключить (или хотя бы существенно ослабить) перечисленные недостатки можно путем исключения промежуточного емкостного звена постоянного (пульсирующего) напряжения и реализации энергоэкономичного и компактного непосредственного преобразования электроэнергии.

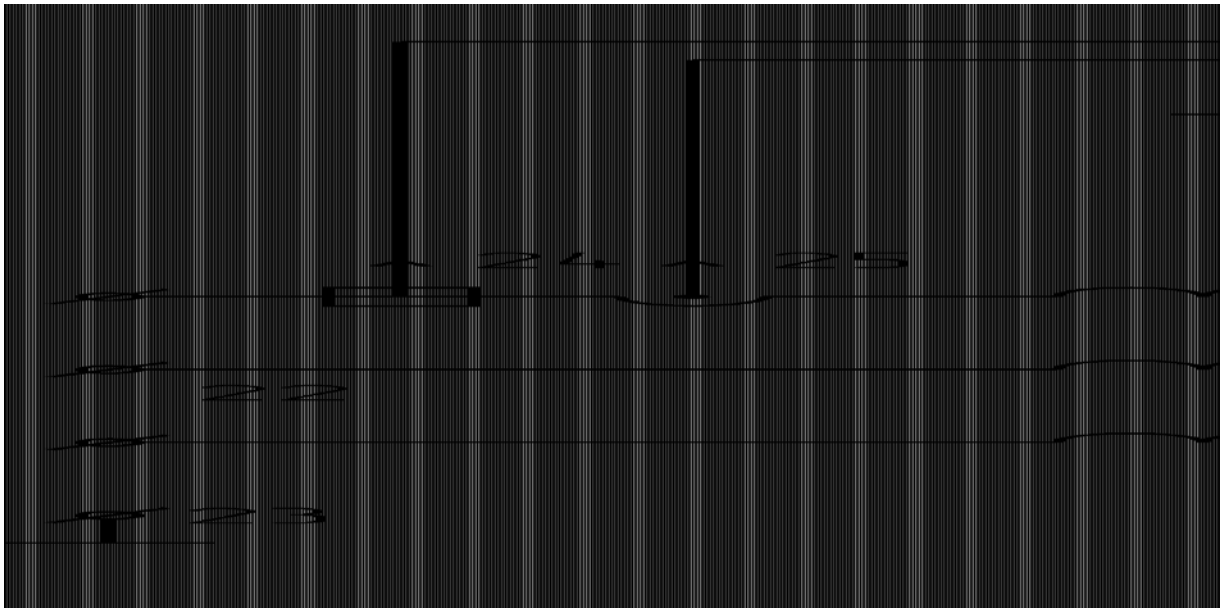

Рис. 2. Система импульсного питания электропривода на базе обратимого корректора коэффициента мощности с непосредственной связью (ОККМНС)

На рис. 2 приведено запатентованное авторами принципиально новое схемотехническое решение - система импульсного питания электропривода на базе трехфазного обратимого корректора коэффициента мощности с непосредственной связью (ОККМНС). Принятые на рис. обозначения: 1-якорная обмотка, 2-обмотка возбуждения, 3-4, 5-6, 7-8-двухключевые электронные (транзисторные) стойки, 9, 10, 11- дополнительные электронные (транзисторные) ключи, 12-13 и 14-15-двухвентильные стойки управляемого мостового выпрямителя, 16-17–конденсаторы,

18-балластные дроссели, 19-схема управления, 20, 21-парные секции обмотки возбуждения, 2, 22-входные фазные выводы питания, 23-вывод заземления, 24, 25, 26, 27-датчики напряжения и тока в цепях входных выводов и якорной обмотки.

Рассмотрим сначала работу устройства в режиме прямого питания (в двигательном режиме) во временном интервале полупериода питающего сетевого напряжения, при котором на входном выводе 22, ближайшем к выводу заземления 23, имеется положительный потенциал относительно последнего. Схема управления 19 в зависимости от полярностей и уровней сигналов датчиков напряжения 24, 26 и тока 25, 27 на данном полупериоде различает три следующих возможных варианта: 1) ток в якорной обмотке 1 направлен от вентильной стойки 12-13 к стойке 14-15, а величина якорной противо-ЭДС (напряжения) не превышает величины фазного сетевого напряжения (режим «прямоходового понижения напряжения»); 2) при том же направлении тока величина якорной противо-ЭДС больше величины фазного сетевого напряжения (из-за высокой скорости привода, т.е. режим «прямоходового повышения напряжения»; 3) ток в якорной обмотке имеет обратное направление (режим «инвертирования»). При этом схема управления реализует широтно-импульсную или релейно-пороговую модуляцию своих высокочастотных выходных импульсных сигналов.

В первом варианте (в режиме «прямоходового понижения») сначала включаются ключи 4, 9 и вентиль 13, после чего нарастает ток по цепи 22-18-4-21-13-1-23 и соответственно нарастает суммарное потокосцепление обмотки возбуждения 2 (за счет тока в её секции 21). Затем через промежуток времени Δt (длительность импульса) ключ 4 выключается, а ключ 9 и вентиль 13 остаются открытыми, и включается вентиль 14. Так как суммарное потокосцепление обмотки возбуждения 2 скачкообразно спадать не может (в соответствии с электротехническим законом коммутации), то происходит частичное плавное спадание тока по цепи 20-9-21-13-1-14-20 в течение времени Тшим -Δt, где Тшим – период широтно-импульсной модуляции. При этом основная часть дозы электромагнитной энергии обмотки возбуждения 2, накопленное ею за время Δt, передается якорной обмотке 1. одновременно с этим конденсаторы 16, 17 заряжаются за счет ЭДС самоиндукции и индуктивностей рассеяния секций 20, 21 и дросселя 18 по цепям 21-13-1-14-16-21 и 20-17-13-1-14-20, а также 22-18-3-17-13-1-23, защищая транзисторные ключи от коммутационных перенапряжений и обеспечивая непрерывность сетевого тока.

При очередном включении ключей 4, 9 и вентиля 13 энергия конденсаторов 16, 17, накопленная при их зарядке, передается секциям 20, 21 обмотки возбуждения по цепям их разряда: 16-20-9 и 17-9-21.

Во втором варианте (в режиме «прямоходового повышения») сначала включаются ключи 4, 9 и вентиль 15, и ток нарастает по цепи 22-4-21-15-23. затем ключ 15 выключается, а включается вентиль 13 и остается включенным ключ 4, после чего ток спадает по цепи 22-4-21-13-1-23, а конденсаторы 16, 17 заряжаются и т.д.

В третьем варианте (в режиме «инвертирования») также сначала включаются ключи 4, 9 и вентиль 15, и ток нарастает по той же цепи 22-4-21-15-23. затем ключ 4 и вентиль 15 выключаются, а включаются а включаются вентили 13,14 и ключ 9, и ток спадает по цепи: 21-13-1-14-20-9 и т.д.

При работе устройства суммарное потокосцепление обмотки возбуждения 2 однонаправлено пульсирует от нижних значений Ψmin до верхних Ψmax, сохраняя свою непрерывность.

Далее указанные процессы периодически повторяются с частотой ШИМ в пределах данного «положительного» сетевого фазного напряжения.

На втором полупериоде рассматриваемого фазного сетевого напряжения с отрицательным потенциалом на том же входном выводе 22 устройства относительно вывода заземления 23 также возможны три варианта, аналогичные рассмотренным.

В качестве примера рассмотрим один из них: ток в якорной обмотке 1 направлен от стойки 12-13 к стойке 14-15. В данном случае этот режим будет режимом «инвертирования».

Сначала включаются ключи 3, 9 и вентиль 14, и ток нарастает по цепи 23-14-20-3-22. Затем ключ 3 выключается, а вентиль 13 включается, и так спадает по цепи 20-9-21-13-1-14-20. одновременно с этим заряжаются конденсаторы 16, 17, которые затем отдают накопленную энергию секциям 20, 21 при очередном включении ключей 3, 9 и вентиля 14, и т.д.

При этом с помощью цепей обратных связей по входным токам и напряжениям и импульсной модуляции схемы управления производится коррекция коэффициента мощности, потребляемой от сети, путем синусного формирования среднеимпульсного значения входного тока за счет регулирования соотношения положительного и отрицательного приращений суммарного потокосцепления секций обмотки возбуждения и синхронизации входных токов с фазными напряжениями сети.

Для реализации режима рекуперативного торможения или режима форсированного развозбуждения (гашения поля возбуждения) двигателя с помощью схемы управления 19 устройство переводится в режим обратного преобразования энергии (от электродвигателя в питающую сеть).

Для демонстрации расширения скоростного диапазона привода, при котором реализуется рекуперативное торможение с непосредственным возвратом энергии в сеть, рассмотрим два граничных случая: 1) случай малой скорости привода, при которой величина якорной ЭДС мала по сравнению с рассматриваемым «положительным» фазным напряжением практически на всем интервала полупериода и 2) случай большой скорости привода, при которой величина якорной ЭДС превышает даже амплитуду фазного напряжения. При этом в обоих случаях пусть датчик напряжения 26 в якорной цепи фиксирует положительный потенциал относительно вывода заземления 23.

В первом случае режим обратного преобразования (рекуперации) будет «прямоходовым повышающим», а во втором «прямоходовымм понижающим».

В первом случае сначала включается вентили 12, 15 и ключ 9, и ток нарастает по цепи 1-12-20-9-21-15-23, а затем ключ 9 и вентиль 15 выключаются, а включается ключ 3 и остается включенным вентиль 12, и ток спадает по цепи 1-12-20-3-18-22-23, возвращая в сеть часть энергии двигателя и дозу электромагнитной энергии, накопленной в обмотке возбуждения 2.

Во втором случае сначала включается вентиль 12 и ключ 3, и ток нарастает по цепи 1-12-20-3-18-22-23, а затем выключается вентиль 12, а остается открытым ключ 3 и включается вентиль 14, и ток спадает по цепи 20-3-18-22-23-14-20.

Таким образом рекуперативное торможения реализуется в максимально широком скоростном диапазоне привода.

Следует обратить внимание на возможность использования самых энергоэкономичных «прямоходовых» режимов преобразования с наименьшими тепловыми потерями, причем с непрерывностью сетевых токов (с наименьшими искажениями кривых тока).

Заключение.

1. Рассмотрена возможность применения схемы Виенна – выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности в системе импульсного питания коллекторного электропривода от трёхфазной сети переменного тока. Схема дополнена обратимым конвертором и обратимым выпрямительно-инверторным мостом для обеспечения режимов рекуперативного торможения и аварийного питания.

2. Предлагается принципиально новое схемотехническое решение на базе обратимого корректора коэффициента мощности с непосредственной связью, не содержащего промежуточного емкостного звена постоянного напряжения.

3. К основным достоинствам предложенной системы относятся:

– высокий КПД благодаря непосредственному преобразованию энергии и применению «прямоходовых» импульсных режимов модуляции;

– отсутствие цепей для «сквозного сверхтока» при несанкционированном включении или пробое транзисторов;

– отсутствие пульсаций выпрямленного напряжения, способных вызвать автоколебания в замкнутой системе регулирования и стабилизации;

– достаточно широкий скоростной диапазон для рекуперативного торможения, позволяющий повысить энергоэкономичность и отказаться от режима динамического торможения (с тепловым рассеянием);

– применимость схемы для наружного использования в широком температурном диапазоне даже при питании от однофазной сети, благодаря отсутствию энергоёмкого нетермостойкого и ненадёжного электролитического емкостного фильтра.

4. Работа представляется полезной для широкого круга исследователей и разработчиков систем импульсного питания коллекторных электроприводов постоянного тока от промышленной или автономной, в частности – транспортной, системы электроснабжения переменного тока.

Список литературы

1. Резников С.Б., Бочаров В.В., Кириллов В.Ю., Постников В.А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость транспортного электрооборудования с высоковольтными цепями питания. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 512 с.

2. Чаплыгин Е.Е., Во Минь Тьинь, Нгуен Хоанг Ан. Виенна-выпрямитель - трехфазный корректор коэффициента мощности // Силовая электроника (приложение к журналу «Компоненты и технологии»). 2006. №1. С. 20-23.

3. Овчинников Д.А., Кастров М.Ю., Лукин А.В., Малышков Г.М. Трехфазный выпрямитель с корректором коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. 2002. № 6. С. 5-15.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Electromagnetic compatibility of a collector electric drive with three-phase AC network

08, August 2012

DOI: 10.7463/0812.0450268

Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kornilov A.B.

Russia, Moscow Aviation Institute (National Research University)

ab_kornilov@mail.ru

The authors propose a completely new circuit solution of pulsed power collector electric drive by introducing adjustment of power consumption coefficient in a single-transmitter, which in contrast to the one-stage transformer. This solution, in contrast to the two-stage scheme with the Vien-rectifier and a step-down converter, contains no intermediate capacitive link of DC voltage. The scheme implements energy efficient and compact direct conversion of electricity consumed by the high quality of the current network, at the same time providing regenerative braking mode and return energy to the network in a wide speed range of the drive. It can be used in airborne sets and electric power plants, including - for advanced aircraft with an all-electric equipment.

Publications with keywords: converter, transformation of energy, PFC, pulsed power supply

Publications with words: converter, transformation of energy, PFC, pulsed power supply

References

1. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kirillov V.Iu., Postnikov V.A. *Elektroenergeticheskaia i elektromagnitnaia sovmestimost' transportnogo elektrooborudovaniia s vysokovol'tnymi tsepiami pitaniia* [Electricity and electromagnetic compatibility of transport electrical equipment with high-voltage power supply circuits]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2010. 512 p.

2. Chaplygin E.E., Vo Min' T'in', Nguen Khoang An. Vienna-vypriamitel' - trekhfaznyi korrektor koeffitsienta moshchnosti [Vien rectifier - three-phase power factor correction]. *Silovaia elektronika (prilozhenie k zhurnalu «Komponenty i tekhnologii»)* [Power Electronics (Supplement to «Components and technologies»)], 2006, no. 1, pp. 20-23.

3. Ovchinnikov D.A., Kastrov M.Iu., Lukin A.V., Malyshkov G.M. Trekhfaznyi vypriamitel' s korrektorom koeffitsienta moshchnosti [Three-phase rectifier with power factor correction]. *Prakticheskaia silovaia elektronika* [Practical power electronics], 2002, no. 6, pp. 5-15.