

С. А. СТЕПЕНКО, аспирант, ЧГТУ, Чернигов

ОБЗОР И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПОСВЯЩЁННЫХ КОРРЕКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

В статье приводится краткий обзор работ, посвящённых коррекции коэффициента мощности. Рассмотрена тематика исследований авторитетных зарубежных учёных, публикации которых представлены в электронной библиотеке IEEE Xplore. Проанализированы направления исследований по теме коррекции коэффициента мощности, по которым в последнее время были защищены диссертации отечественными учёными. На основе проведённого обзора сформулированы перспективы дальнейших исследований по теме коррекции коэффициента мощности.

Ключевые слова: энергоэффективность, коррекция коэффициента мощности.

Введение

В настоящее время всё большую актуальность приобретают исследования, посвященные качеству электрической энергии. В частности, это связано с ростом количества и разновидностей используемых нелинейных нагрузок. Гармоники напряжения и тока, которые возникают при использовании нелинейных нагрузок, приводят к увеличению потерь мощности и, следовательно, оказывают негативное влияние на системы распределения электрической энергии и их компоненты. Среди этих тенденций, коррекция коэффициента мощности (ККМ) или требования по сокращению гармоник в соответствии со стандартом IEC 61000-3-2, выделяется как наиболее значительная отличительная черта в архитектуре современных источников питания.

С ростом уровня мощности для всех видов оборудования и с расширением применения стандартов по сокращению гармоник, все больше разработок источников питания используют ККМ. Разработчики сталкиваются с задачами включения соответствующего блока ККМ и в то же время необходимостью выполнить иные нормативные требования: сокращение потерь мощности, эффективность в активном режиме, ограничение электромагнитных помех.

Цель работы

Решение проблемы обеспечения энергоэффективности путём использования корректоров коэффициента мощности возможно лишь при условии комплексного подхода к реализации ККМ, который подразумевает учёт максимально широкого спектра смежных задач.

Целью данной работы является выявление и формулирование перспективных направлений работ, посвящённых коррекции коэффициента мощности, на основе обзора современных исследований зарубежных и отечественных учёных.

Анализ исследований зарубежных учёных

Одним из фактов, характеризующих рост актуальности исследований по теме коррекции коэффициента мощности, может служить анализ публикаций, представленных в электронной библиотеке IEEE Xplore Международного института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике.

Всего по состоянию на март 2013 года по теме коррекции коэффициента мощности опубликовано 426 статей в журналах, представленных в IEEE Xplore. При этом количество работ, опубликованных за последние 6 лет, составляет половину от всех публикаций. Вместе с ростом количества статей за год расширяется и тематика работ.

На рис. представлена диаграмма, иллюстрирующая рост количества зарубежных публикаций, посвящённых ККМ, за последние двадцать лет. При этом следует отметить, что учитывались лишь публикации в рецензируемых журналах с высоким индексом цитирования. Публикации в материалах конференций не принимались во внимание.

Статьи IEEE Xplore

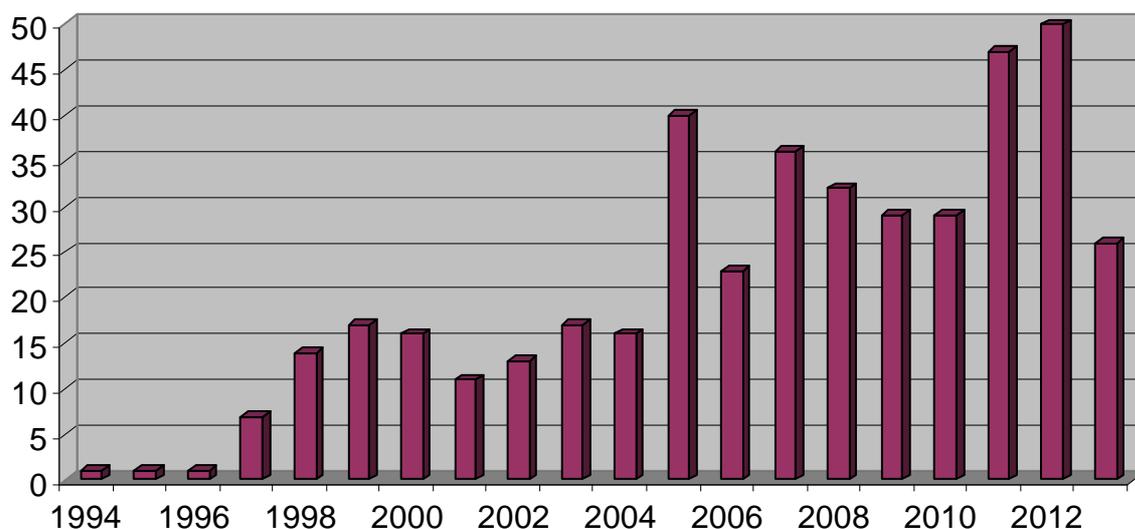


Рис. – Диаграмма роста количества публикаций, посвящённых коррекции коэффициента мощности, в электронной библиотеке IEEE Xplore в 1994-2013 годах

Среди представителей зарубежья, проводящих исследования по коррекции коэффициента мощности, можно выделить следующих авторитетных учёных: Fred Lee, Chi Michael Tse, Jung-Min Min Kwon, Piraveen Jain, Woo-Young Choi, Milanm Jovanović, Yungtaek Jang, Bong-Hwan Kwon, Johannw Walter Kolar, Keyue Smedley, Dragan Maksimović, Frede Blaabjerg и другие.

Тематика исследований, посвящённых коррекции коэффициента мощности достаточно широка. Здесь рассмотрены основные актуальные вопросы исходя из наиболее цитируемых публикаций.

ККМ широко применяются как в однофазных, так и в трёхфазных преобразователях. Одним из наиболее частых однофазных применений ККМ является использование в флуоресцентных лампах [11]. Описанный в работе [17] трёхфазный понижающий преобразователь с ККМ для применения в системах телекоммуникаций обеспечивает коэффициент полезного действия около 99%.

В работе [9] представлен обзор методов активной коррекции коэффициента мощности, применяемых для однофазных схем. Основное внимание уделяется реализации переключения при нулевом напряжении (ПНН) и переключения при нулевом токе (ПНТ), а также использованию снабберов. В работе [4] рассмотрены

основные схемы ККМ, а также особенности управления для применения в трёхфазных преобразователях. Представлены возможности обеспечения «мягкого» переключения, среди которых основными используемыми схемами являются резонансные, квазирезонансные, мультирезонансные преобразователи, схемы с квазипрямоугольной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и другие.

Повышающий преобразователь с ККМ при управлении на основе среднего значения тока рассматривается в качестве нелинейной системы в работе [13]. На основе анализа бифуркационных и хаотических процессов в системе ККМ, сформулированы условия его устойчивости. В работе [16] представлена нелинейная модель ККМ для режима управления на основе среднего значения тока. Используя метод двойного усреднения, определяются диапазоны параметров, при которых гарантируется стабильная работа системы. А работа [6] посвящена отдельно проблеме искажений входного тока ККМ вблизи нуля при управлении на основе среднего значения тока. Для решения этой проблемы предложен специальный метод фазовой задержки.

Безмостовые схемы ККМ появились после того, как было признано, что диодный мост на входе любого ККМ обычно приносит значительные потери мощности при полной нагрузке. Безмостовые схемы определённо требуют более сложных алгоритмов управления. Наиболее известные решения включают перемещение индуктивности в цепь переменного тока выпрямителя и замену нижних диодов выпрямителя на транзисторы, чтобы получить повышающие преобразователи для каждого плеча. В работе [5] представлен систематический обзор безмостовых топологий ККМ и проведён анализ их производительности. А в работе [14] рассматриваются возможности сокращения уровня электромагнитных помех для безмостовых ККМ.

Другая современная тенденция заключается в применении концепции чередования для схем ККМ, рекомендации по разработке которых приведены в работе [12]. При этом, один преобразователь заменяется на два или более параллельно работающих преобразователей, каждой из которых работает в такой фазе, чтобы пульсации тока при суммировании на выходе или входе взаимно компенсировались, что приводит к снижению требований по фильтрации. Другие преимущества такого подхода заключаются в обеспечении модульности, рассеивании тепла, а также возможности оптимизации соотношения цена/производительность. Конечно, существуют определённые недостатки, такие как большее количество компонентов и более сложные системы управления.

В работе [8] осуществляется комплексный подход к реализации ККМ, где учитывается коэффициент мощности, уровень гармонических искажений и коэффициент полезного действия преобразователя. Доказана эффективность использования обратной связи по выходному напряжению. А в работе [15] показана возможность использования обратной связи по напряжению с опорного конденсатора для снижения искажений напряжения и тока в ККМ при работе в режимах непрерывного и прерывистого входного тока.

В работе [2] представлены различные топологии для формирования входного тока в режиме непрерывной проводимости (непрерывного входного тока) и в режиме прерывистой проводимости (прерывистого входного тока). А в работе [10] приведён обзор повышающих преобразователей с фиксированной частотой ШИМ, ра-

ботающих в режиме непрерывного входного тока. Различные методы управления ККМ и, в частности, управление на основе программирования входного тока для однофазного двухключевого повышающе-понижающего преобразователя рассмотрены в работе [1].

Прогнозирующий контроль на основе цифровых методов управления для повышающих, понижающих и повышающе-понижающих преобразователей рассмотрен в работе [7]. Отмечается, что предложенные методы могут успешно использоваться при реализации ККМ. Прогнозирующий контроль для управления ККМ также рассматривается в работе [18], где предложенный метод разработан для реализации на базе цифрового сигнального процессора (ЦСП) и позволяет достичь единичного коэффициента мощности.

Особенно следует отметить тенденцию использования программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) для реализации ККМ. Основным отличием от решений на базе ЦСП является возможность одновременного выполнения всех процедур контроля, что обеспечивает высокую продуктивность и возможность реализации сложных методов управления [3]. При использовании ПЛИС алгоритм управления разрабатывается с использованием языка описания аппаратных средств (VHDL), который обеспечивает большую гибкость.

Анализ исследований отечественных учёных

Расширение направлений и углубление исследований, посвящённых вопросам энергоэффективности, в последние годы имеет место и на территории стран СНГ. Вопросами, связанными с энергоэффективностью, занимается множество авторитетных отечественных учёных. В частности, Товажнянский Леонид Леонидович (теплоэнергетика), Сокол Евгений Иванович (качество электроэнергии, электромагнитная совместимость), Кириленко Александр Васильевич (энергосбережение), Жуйков Валерий Яковлевич (интеллектуальное управление процессами энергопотребления), Харитонов Сергей Александрович (энергоэффективные многоуровневые преобразователи).

Что касается непосредственно тематики работ, посвящённых коррекции коэффициента мощности, следует отметить, что за последние годы по этому направлению было защищено несколько диссертаций учёными Украины и России. На основе материалов, представленных в каталогах диссертаций, следует выделить исследования таких учёных: Бородин Кирилл Валерьевич, Кондратьев Дмитрий Евгеньевич, Крылов Денис Сергеевич, Малаханов Алексей Алексеевич, Нгуен Хоанг Ан, Овчинников Денис Александрович, Серебрянников Александр Владимирович.

Решение проблемы коррекции коэффициента мощности и мощности искажений с обеспечением требуемого уровня надёжности на основе преобразователя инвертирующего типа с дозированием накапливаемой и отдаваемой в сеть энергии рассматривается в работе [19]. Для уверенного проектирования такого рода устройств необходимо построение математических моделей этих новых решений, их реализация, проведение всестороннего анализа динамических свойств и синтеза на основе полученных знаний силовых цепей и систем управления.

В работе [20] значительное внимание уделяется трёхфазным выпрямителям с коррекцией коэффициента мощности. Исследованы статические и динамические характеристики активных выпрямителей напряжения и активных выпрямителей тока с векторной системой управления, а также с системой прямого управ-

ления мощностью. Разработан аналитический метод проектирования матриц переключения ключей систем прямого управления мощностью активных выпрямителей напряжения.

Преобразовательная система с близким к единице коэффициентом мощности, выполненная на основе компенсированного управляемого выпрямителя (КУВ) и силового активного фильтра (САФ) предложена в работе [21]. Ее существенным отличием от существующих систем является возможность компенсации реактивной мощности на стороне питающей сети средствами силовой части ККВ, в то время, как на САФ ложится только функция компенсации высших гармоник тока в сети. Применение таких систем позволяет получить близкий по форме к синусоиде ток сети во всех режимах работы, а величину реактивной мощности – равной нулю или иному заданному значению. Также минимизируется мощность потерь в элементах силовой схемы за счет исключения реактивной составляющей тока в вентильных и сетевых обмотках преобразовательного трансформатора и за счет того, что коммутация ключей САФ осуществляется при токах на порядок меньших, чем номинальный ток нагрузки, что позволяет существенно уменьшить динамические потери в вентилях.

В работе [22] представлены математические модели импульсно-модуляционных систем с коррекцией коэффициента мощности и повышающего преобразователя напряжения и методики их численно-аналитического решения. Разработаны алгоритмы поиска периодических режимов и расчета карт динамических режимов корректора коэффициента мощности в пространстве параметров системы. Также разработан программный комплекс для моделирования и автоматизации инженерных расчетов импульсно-модуляционных систем с коррекцией коэффициента мощности.

Управление трехфазными выпрямителями с активной коррекцией коэффициента мощности представлено в работе [23]. Разработаны быстродействующие модели для исследования электромагнитных процессов в ККМ с синхронным и асинхронным управлением, основанные на модифицированном спектральном методе переключающих функций, а также на основе решения рекуррентной системы разностных уравнений. Проведено сравнения качества сетевого тока ККМ при синхронном и асинхронном управлении. Определено влияние несимметрии сети, силовой схемы и управления преобразователем на коэффициент мощности преобразователя и пульсации на стороне постоянного тока при различных способах управления ККМ. Проведен анализ способов построения систем управления трехфазными ККМ, выявлены причины потери управляемости следящих систем управления, найдены способы восстановления работоспособности системы управления.

В работе [24] представлены теоретические исследования корректора коэффициента мощности (ККМ) как линейной импульсной системы автоматического управления и разработаны модели для анализа и синтеза. Построен цифровой алгоритм управления ККМ на основе дискретных фильтров. Проведена сравнительная оценка различных вариантов построения выпрямителей с ККМ как с точки зрения этапов преобразования энергии, так и с точки зрения топологии используемых преобразователей. Проведены теоретические и экспериментальные исследования увеличения эффективности ККМ на основе повышающего преобразователя с помощью различных способов уменьшения динамических потерь в

силовых ключах и возможности применения различных магнитных материалов для силового дросселя ККМ.

Аналитический обзор микросхем, реализующих аналоговое управление однофазными ККМ трех основных групп схем, анализ принципов построения, методик проектирования и процессов в активных ККМ, построенных на базе этих микросхем, приведён в работе [25]. Выполнен анализ, дополнительное обоснование, уточнение методик проектирования ККМ, приводимых в рекомендациях по применению компаний-изготовителей микросхем управления ККМ, а также методик расчета переходных, установившихся режимов и показателей качества ККМ, основанных на трех основных структурах систем управления. Разработаны и исследованы математические модели ККМ и программы компьютерного имитационного моделирования. Представлены результаты экспериментальных исследований ККМ на реальном макете.

Выводы

На основе проведённого анализа работ зарубежных и отечественных учёных, можно утверждать, что работы, посвящённые коррекции коэффициента мощности, становятся всё более актуальными. Это подтверждается ростом количества публикаций в рецензируемых зарубежных журналах, а также защищаемыми в последние годы диссертациями отечественных учёных.

Решение проблемы обеспечения энергоэффективности путём использования корректоров коэффициента мощности возможно лишь при условии комплексного подхода к реализации ККМ, который подразумевает учёт максимально широкого спектра смежных задач. При этом, кроме обеспечения максимального коэффициента мощности, внимание стоит уделять коэффициенту полезного действия системы и снижению уровня электромагнитных помех.

Для обеспечения надёжности функционирования системы с ККМ следует рассмотреть условия её устойчивости. При этом, более качественные результаты даёт подход, когда ККМ представляется как нелинейная система.

Использование цифровых систем управления ККМ позволяет реализовать новые и более сложные алгоритмы управления (например, прогнозирующий контроль) для основных режимов (непрерывной проводимости, прерывистой проводимости, граничной проводимости) в различных типах преобразователей.

Выбор элементной базы для реализации таких систем в последнее время смещается от микроконтроллеров и цифровых сигнальных процессоров к программируемым логическим интегральным схемам (ПЛИС), что кроме повышения быстродействия даёт возможность одновременного выполнения вычислений в нескольких блоках управления, а также ряд других преимуществ.

Список литературы: 1. Andersen, G.K.; Blaabjerg, F., "Current programmed control of a single-phase two-switch buck-boost power factor correction circuit," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.53, no.1, pp.263,271, Feb. 2006. 2. Chongming Qiao; Smedley, K.M., "A topology survey of single-stage power factor corrector with a boost type input-current-shaper," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.16, no.3, pp.360,368, May 2001. 3. De Castro, A.; Zumel, P.; Garcia, O.; Riesgo, T.; Uceda, J., "Concurrent and simple digital controller of an AC/DC converter with power factor correction based on an FPGA," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.18, no.1, pp.334,343, Jan 2003. 4. Hengchun Mao; Lee, F.C.Y.; Boroyevich, D.; Hiti, S., "Review of high-performance three-phase pow-

er-factor correction circuits," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.44, no.4, pp.437,446, Aug 1997. **5.** *Huber, L.; Yungtaek Jang; Jovanovic, M.M.*, "Performance Evaluation of Bridgeless PFC Boost Rectifiers," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.23, no.3, pp.1381,1390, May 2008. **6.** *Jian Sun*, "On the zero-crossing distortion in single-phase PFC converters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.19, no.3, pp.685,692, May 2004. **7.** *Jingquan Chen; Prodic, A.; Erickson, R.W.; Maksimovic, D.*, "Predictive digital current programmed control," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.18, no.1, pp.411,419, Jan 2003. **8.** *Jinrong Qian; Qun Zhao; Lee, F.C.*, "Single-stage single-switch power-factor-correction AC/DC converters with DC-bus voltage feedback for universal line applications," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.13, no.6, pp.1079,1088, Nov 1998. **9.** *Jovanovic, M.M.; Yungtaek Jang*, "State-of-the-art, single-phase, active power-factor-correction techniques for high-power applications - an overview," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.52, no.3, pp.701,708, June 2005. **10.** *Lai, Z.; Smedley, K.M.*, "A family of continuous-conduction-mode power-factor-correction controllers based on the general pulse-width modulator," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.13, no.3, pp.501,510, May 1998. **11.** *Lam, J.C.W.; Jain, P.K.*, "A High-Power-Factor Single-Stage Single-Switch Electronic Ballast for Compact Fluorescent Lamps," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.25, no.8, pp.2045,2058, Aug. 2010. **12.** *Nussbaumer, T.; Raggl, K.; Kolar, J.W.*, "Design Guidelines for Interleaved Single-Phase Boost PFC Circuits," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.56, no.7, pp.2559,2573, July 2009. **13.** *Orabi, M.; Ninomiya, T.*, "Nonlinear dynamics of power-factor-correction converter," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.50, no.6, pp.1116,1125, Dec. 2003. **14.** *Pengju Kong; Shuo Wang; Lee, F.C.*, "Common Mode EMI Noise Suppression for Bridgeless PFC Converters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.23, no.1, pp.291,297, Jan. 2008. **15.** *Qun Zhao; Lee, F.C.; Tsai, F.-S.*, "Voltage and current stress reduction in single-stage power factor correction AC/DC converters with bulk capacitor voltage feedback," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.17, no.4, pp.477,484, Jul 2002. **16.** *Siu-Chung Wong; Tse, C.K.; Orabi, M.; Ninomiya, T.*, "The method of double averaging: an approach for modeling power-factor-correction switching converters," *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, vol.53, no.2, pp.454,462, Feb. 2006. **17.** *Stupar, A.; Friedli, T.; Minibock, J.; Kolar, J.W.*, "Towards a 99% Efficient Three-Phase Buck-Type PFC Rectifier for 400-V DC Distribution Systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.27, no.4, pp.1732,1744, April 2012. **18.** *Zhang, W.; Guang Feng; Yan-Fei Liu; Bin Wu*, "A digital power factor correction (PFC) control strategy optimized for DSP," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.19, no.6, pp.1474,1485, Nov. 2004. **19.** *Бородин К. В.* Динамика инвертирующего полупроводникового преобразователя с коррекцией коэффициента мощности: дис. канд. техн. наук: 05.09.12. – Томск, 2010. – 175 с. **20.** *Кондратьев Д. Е.* Трёхфазные выпрямители с активной коррекцией коэффициента мощности и двунаправленной передачей энергии: дис. канд. техн. наук: 05.09.12. – Москва, 2008. – 194 с. **21.** *Крылов Д. С.* Полупроводниковые преобразователи переменного напряжения в постоянное с близким к единице коэффициентом мощности: дис. канд. техн. наук: 05.09.12. – Харьков, 2003. – 183 с. **22.** *Малаханов А. А.* Математическое моделирование импульсно-модуляционных систем с коррекцией коэффициента мощности: дис. канд. техн. наук: 05.13.18. – Брянск, 2007. – 175 с. **23.** *Нгуен Хоанг Ан.* Управление трехфазными выпрямителями с активной коррекцией коэффициента мощности: дис. канд. техн. наук: 05.09.12. – Москва, 2006. – 222 с. **24.** *Овчинников Д. А.* Разработка и исследование однофазных корректоров коэффициента мощности: дис. канд. техн. наук: 05.09.12.– Москва, 2004. – 153 с. **25.** *Серебрянников А. В.* Анализ и расчет корректоров коэффициента мощности на базе современных микросхем управления: дис. канд. техн. наук: 05.09.12. – Чебоксары, 2010. – 182 с.

Надійшла до редколегії 16.03.2013

УДК 621.316.72

Обзор и перспективы развития исследований, посвящённых коррекции коэффициента мощности/ С. А. Степенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 18 (991). – С. 34–41. – Бібліогр.: 25 назв.

У статті наводиться короткий огляд робіт, присвячених корекції коефіцієнта потужності.

Розглянуто тематику досліджень авторитетних зарубіжних вчених, публікації яких представлені в електронній бібліотеці IEEE Xplore. Проаналізовано напрямки досліджень за темою корекції коефіцієнта потужності, за якими останнім часом були захищені дисертації вітчизняними вченими. На основі проведеного огляду сформульовані перспективи подальших досліджень по темі корекції коефіцієнта потужності.

Ключові слова: енергоефективність, корекція коефіцієнта потужності.

The brief overview of the works, devoted to a power factor correction, is provided in this article. The topics of the investigations of competent foreign scientists, which publications are presented in the digital library IEEE Xplore, have been considered. The trends of the researches on a power factor correction, by which have been recently defended the theses of domestic scientists, have been analyzed. The prospects of the further studies on a power factor correction have been formulated based on the provided overview.

Keywords: energy efficiency, power factor correction.

УДК 621.314

Д. В. КУЧЕРЕНКО, студент, ДонГТУ, Алчевск;

П. С. САФРОНОВ, канд. техн. наук, доц. ДонГТУ, Алчевск

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА

Выполнено исследование работы параллельного активного фильтра высших гармоник тока. Рассмотрена работа активного фильтра гармоник на нелинейную нагрузку, представленную в виде диодного выпрямителя с RLC-нагрузкой. Приведены временные диаграммы тока нагрузки, корректирующего тока и суммарного тока, выполнен спектральный анализ тока нелинейной нагрузки и скомпенсированного тока.

Ключевые слова: активный фильтр, гармоники тока, нелинейная нагрузка, моделирование, коэффициент гармоник.

Введение

Стремительное развитие силовой электроники привело к появлению большого количества нелинейных нагрузок, которые потребляют несинусоидальный ток из питающей сети, а также генерируют гармоники высших порядков. В большей части, такого рода нагрузку представляют собой полупроводниковые преобразователи, например: силовые диодные выпрямители, преобразователи частоты, циклоконверторы и прочие.

Реактивная мощность и мощность искажений, протекая по элементам электрической сети, обладающим активным сопротивлением, вызывают в них дополнительные потери электрической энергии. Кроме того, реактивная мощность и