

ИТ-ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/071>

SIMULATION STUDY OF A CONTROLLED REACTOR COMPENSATOR

¹*Smail A.A., ¹Smagulova K.K., ²Romanets A.O., ³Baranovskyi V.D., ³Baranovska M.L.*

¹*Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan*

²*Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine*

³*Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine*

** Corresponding author email: arailym1997s@gmail.com*

Author information:

Smail A.A. - Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: arailym1997s@gmail.com

Smagulova K.K. - Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

Romanets A.O. - Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine, E-mail: dareyomg@gmail.com

Baranovskyi V.D. - Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, E-mail: vladislav.baranovskiy4@gmail.com

Baranovska M.L. - Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, E-mail: mila.baranovskaya@gmail.com

Abstract. The article explores issues of improving power quality in the intra-shop networks of industrial enterprises through the use of controlled reactor-based compensators. The relevance is driven by the increasing energy intensity of technological processes, the growing number of power converters, and heightened requirements for power supply reliability. Existing methods of reactive power compensation are reviewed. The novelty of the work lies in the development of schematic diagrams and mathematical models for single-phase and three-phase reactor-based compensators using semiconductor switches, which enable smooth regulation of reactive power. A mathematical model in MATLAB/SimScope/Electrical is proposed, and the results of mathematical modeling with a high-power induction motor are presented. It is established that the compensator stabilizes the power factor, reduces voltage fluctuations, and enhances reliability. Future work involves the development of automatic control systems for controlled reactor-based compensators.

Keywords: reactive power compensation, mathematical modeling, reactive power, power system stability, PID controller, control system, transients.

БАСҚАРЫЛАТЫН РЕАКТОР КОМПЕНСАТОРЫН ИМИТАЦИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

¹*Смайл А.А., ¹Смагулова К.К., ²Романец А.О., ³Барановский В.Д., ³Барановская М.Л.*

¹*Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан*

²*Запорожье ұлттық университеті, Запорожье, Украина*

³*Кривой Рог ұлттық университеті, Кривой Рог, Украина*

**Корреспондент автор e-mail: arailym1997s@gmail.com*

Авторлар туралы ақпарат:

Смайл А.А. - Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан, E-mail: arailym1997s@gmail.com

Смагулова К.К. - Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

Романец А.О. - Запорожье ұлттық университеті, Запорожье, Украина, E-mail: dareyomg@gmail.com

Барановский В.Д. - Кривой Рог ұлттық университеті, Кривой Рог, Украина, E-mail: vladislav.baranovskiy4@gmail.com

Барановская М.Л. - Кривой Рог ұлттық университеті, Кривой Рог, Украина, E-mail: mila.baranovskaya@gmail.com

Аңдатпа. Мақалада басқарылатын реакторлық компенсаторларды қолдану арқылы өнеркәсіптік кәсіпорындардың цехаралық желілеріндегі электр энергиясының сапасын арттыру мәселелері зерттеледі. Өзектілігі технологиялық процестердің энергия сыйымдылығының артуына, қуат түрлендіргіштерінің көбеюіне және электрмен жабдықтау сенімділігіне қойылатын талаптардың артуына байланысты. Реактивті қуатты өтеудің қолданыстағы әдістері қарастырылған. Жұмыстың жаңалығы реактивті қуаттың біркелкі реттелуін қамтамасыз ететін жартылай өткізгіш кілттерді қолдана отырып, реакторлық компенсаторлардың бір фазалы және үш фазалы схемалары мен математикалық модельдерін жасау болып табылады. MATLAB/SimScope/Electrical-да математикалық модель ұсынылды, жоғары қуатты асинхронды қозғалтқышы бар математикалық модельдеу нәтижелері келтірілген. Компенсатор қуат коэффициентін тұрақтандырады, кернеудің ауытқуын азайтады және сенімділікті арттырады. Алдағы уақытта басқарылатын реакторлық компенсаторларды автоматты басқару жүйесін әзірлеу жоспарлануда.

Түйін сөздер: реактивті қуатты өтеу, математикалық модельдеу, реактивті қуат, электр желісінің тұрақтылығы, ПИД реттегіші, басқару жүйесі, өтпелі кезеңдер.

ИМИТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО РЕАКТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА

¹Смайл А.А., ¹Смагулова К.К., ²Романец А.О., ³Барановский В.Д., ³Барановская М.Л.

¹Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

²Запорожский национальный университет, Запорожье, Украина

³Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина

*Корреспондент автор e-mail: arailym1997s@gmail.com

Информация об авторах:

Смайл А.А. - Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан, E-mail: arailym1997s@gmail.com

Смагулова К.К. - Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

Романец А.О. - Запорожский национальный университет, Запорожье, Украина, E-mail: dareyomg@gmail.com

Барановский В.Д. - Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, E-mail: vladislav.baranovskiy4@gmail.com

Барановская М.Л. - Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, E-mail: mila.baranovskaya@gmail.com

Аннотация. В статье исследуются вопросы повышения качества электроэнергии во внутрицеховых сетях промышленных предприятий посредством применения управляемых реакторных компенсаторов. Актуальность обусловлена ростом энергоёмкости технологических процессов, увеличением числа силовых преобразователей и возросшими требованиями к надёжности электроснабжения. Рассмотрены существующие методы компенсации реактивной мощности. Новизна работы заключается в разработке принципиальных схем и математических моделей однофазных и трёхфазных схем реакторных компенсаторов с использованием полупроводниковых ключей, обеспечивающих плавное регулирование реактивной мощности. Предложена математическая модель в MATLAB/SimScope/Electrical, приведены результаты математического моделирования с асинхронным двигателем большой мощности. Установлено, что компенсатор стабилизирует коэффициент мощности, снижает колебания напряжения и повышает надёжность. В дальнейшем планируется разработка систем автоматического управления управляемых реакторных компенсаторов.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, математическое моделирование, реактивная мощность, устойчивость энергосистемы, ПИД-регулятор, система управления, переходные процессы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Разработаны принципиальные схемы и математические модели однофазного и трёхфазного управляемого реакторного компенсатора на базе мостовых диодно-транзисторных ключей переменного тока, обеспечивающих плавное регулирование реактивной мощности. Модели реализованы в среде MATLAB/SimScope/Electrical и позволяют

исследовать регулировочную характеристику $Q = f(\gamma)$ при различных значениях установленной ёмкости фильтра. Установлено, что существует значение ёмкости, при котором регулировочная характеристика приобретает практически линейный характер. Моделирование узла нагрузки с асинхронным двигателем мощностью 3500 кВт подтвердило возможность плавного регулирования реактивной мощности в широком

диапазоне, стабилизации коэффициента мощности и снижения провалов напряжения. Применение двухоперационных тиристоров (GTO, IGCT) существенно снижает стоимость предложенного технического решения.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития промышленности характеризуется ростом уровня автоматизации, широким применением силовой электроники и увеличением доли электроприводов переменной и постоянной скорости. В таких условиях качество электроэнергии во внутрицеховых сетях электроснабжения становится критически важным фактором стабильности технологических процессов, энергоэффективности производства и надежности электрооборудования. Ухудшение параметров электроэнергии в цеховых сетях приводит к снижению производительности технологического оборудования, увеличению энергопотребления и росту затрат на ремонт и техническое обслуживание.

Одним из ключевых аспектов обеспечения надлежащего качества электроэнергии является компенсация реактивной мощности (КРМ). Наличие в сети значительных потоков реактивной энергии вызывает дополнительные потери в электрических сетях, уменьшение пропускной способности линий, увеличение падения напряжения и, как следствие, нарушение режимов работы электроприемников. В промышленных условиях, особенно на крупных предприятиях с энергоемкими технологиями, этот фактор приобретает решающее значение.

Качество электроэнергии определяется совокупностью параметров, характеризующих отклонения напряжения, частоты, симметрии фаз и гармонического состава от номинальных значений. В соответствии с международными и национальными стандартами (IEC 61000, EN 50160, ДСТУ EN 50160:2014), основными показателями являются:

- отклонения и колебания напряжения;
- коэффициент несинусоидальности (гармонические искажения);
- несимметрия напряжения и тока;
- быстрые изменения напряжения;
- провалы, перенапряжения, перерывы питания.

Для большинства промышленных технологий допустимые пределы отклонений напряжения составляют $\pm 5... \pm 10\%$ от номинала, а коэффициент несинусоидальности не должен превышать 5-8 %. В цеховых сетях электроснабжения ухудшение качества электроэнергии часто связано именно с высокой

долей индуктивной нагрузки - электродвигателей, сварочных аппаратов, трансформаторов, индукционных печей, потребляющих реактивную мощность.

Реактивная мощность (Q) не выполняет полезной работы, но необходима для создания электромагнитного поля в индуктивных элементах электрических цепей. Ее наличие обуславливает увеличение полной мощности (S) и токов в сети, что приводит к дополнительным потерям активной мощности (P) в линиях и трансформаторах.

Компенсация реактивной мощности позволяет уменьшить токовые нагрузки, стабилизировать напряжение, снизить потери энергии и повысить эффективность работы электроустановок. В зависимости от условий, применяют различные технические решения:

- стационарные батареи конденсаторов (БК) - для стабильной нагрузки;
- автоматические установки КРМ - для переменных графиков потребления;
- синхронные компенсаторы - для высокой гибкости и улучшения режимов;
- управляемые тиристорные компенсаторы (STATCOM, TCR) - для быстрой реакции в динамических режимах.

Экономическая эффективность КРУ подтверждается значительным снижением штрафов за низкий коэффициент мощности, уменьшением затрат на энергию и повышением ресурса оборудования.

В отличие от магистральных и распределительных сетей высокого напряжения, цеховые сети работают в непосредственной близости к электроприемникам. Это делает их более чувствительными к колебаниям нагрузки и локальным источникам искажений.

Недостаточный уровень компенсации реактивной мощности в цеховых сетях приводит к ощутимым экономическим потерям:

- прямые потери энергии: повышенный нагрев кабелей и трансформаторов увеличивает затраты активной энергии на 5-15 %;
- косвенные потери: уменьшение производительности оборудования, остановки технологических процессов, увеличение затрат на ремонт;
- штрафы и повышенные тарифы от энергоснабжающих компаний за низкий коэффициент мощности;
- ускоренное старение оборудования: изоляционные материалы и обмотки электродвигателей деградируют быстрее из-за перегрева и нестабильного напряжения.

По оценкам, на предприятиях тяжелой промышленности внедрение современных систем КРМ окупается в течение 1-3 лет за счет уменьшения потерь и штрафных санкций.

В соответствии с ДСТУ EN 50160:2014 и Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), в промышленных сетях напряжением до 1 кВ рекомендуется поддерживать $\cos \varphi$ не ниже 0,9, а для мощных потребителей - не ниже 0,95. Это делает внедрение КРМ не только технически целесообразным, но и нормативно необходимым.

Таким образом, проблема повышения качества электроэнергии в цеховых сетях электроснабжения является актуальной, учитывая растущие требования к энергоэффективности, надежности и стабильности промышленных технологий. Особое значение имеет внедрение эффективных средств компенсации реактивной мощности, обеспечивающих: стабильный уровень напряжения, уменьшение токовых нагрузок, снижение потерь энергии, увеличение ресурса оборудования, выполнение нормативных требований.

Углубленное исследование этой проблематики позволит создать комплексные технические решения, сочетающие современные методы КРМ с системами мониторинга и автоматического регулирования параметров качества электроэнергии, что особенно важно для высокотехнологичных и энергоемких производств.

В современных системах распределения электроэнергии промышленные нагрузки не только потребляют активную мощность, но и создают значительные потоки реактивной мощности, вносят гармонические искажения в напряжения и токи. Эта ситуация связана как с особенностями структуры промышленного оборудования, так и с широким использованием полупроводниковых преобразователей при модернизации существующих систем электроснабжения.

Кроме того, нарушения качества электроэнергии имеют целый ряд негативных последствий для энергосистемы, влияя на ее общую производительность и надежность.

Для решения этих проблем и повышения качества электроэнергии в течение многих лет разрабатывали и совершенствовали силовые активные фильтры электроэнергии (active power filter, APF).

В работе авторов Asit Mohanty et al. [1] проведен всесторонний анализ механизмов управления, предназначенных для улучшения качества электроэнергии в электроэнергетических системах. Также рассматриваются вопросы, связанные с выбором

компонентов фильтров с учетом как технических, так и экономических факторов. В статье обсуждаются факторы, влияющие на выбор фильтров, адаптированных для конкретных применений, с целью достижения наилучшей производительности и экономической эффективности.

Для решения проблем повышения качества электроэнергии Khairul Anuar Mohd Nor et al., [2], предлагают использовать активно-пассивный гибридный фильтр гармоник, разработанный для минимизации уровней гармоник в трехфазных электрических системах в соответствии со стандартами IEEE-519. Анализ результатов показал, что предложенный фильтр эффективно снижает гармоническое загрязнение до 58,63%, что значительно улучшает качество электроэнергии и способствует повышению надежности современных энергосистем. Однако это исследование не затрагивает проблем, связанных с другими показателями качества электроэнергии и реактивной мощностью.

Работа авторов Timothy Oluwaseun Araoye et al. [3] посвящена применению последовательного активного фильтра для снижения уровня высших гармоник в трехфазном асинхронном двигателе. Применение метода ANN-Grasshopper optimization Shunt Active filters (ANN-GOSAF) для управления последовательным активным фильтром обеспечивает значительное снижение гармоник тока и напряжения, что приводит к повышению производительности двигателя и энергоэффективности. Однако полученные результаты не могут быть использованы для мощных потребителей других типов. Авторами M. Karthikeyan et al. [4] описывается использование шунтирующего фильтра активной мощности (SAPF) для компенсации реактивной мощности (Q) и гармоник тока. В работе для оценки параметров трехфазной нагрузки применен нейросетевой алгоритм на основе ADALINE, который может управлять SAPF для поддержания синусоидальных токов источника и единичного коэффициента мощности (PF).

Авторы Abdallah El Ghaly et al. (2024), [5], подчеркивают роль активных фильтров мощности (APFs) в улучшении качества электроэнергии. Авторы добились существенного снижения гармонических искажений напряжения при использовании метода "карандаша матриц" (matrix pencil method, MPM) для более точного извлечения опорного напряжения.

В работе [6] Annu Govind et al описывают системный подход к улучшению качества электроэнергии с помощью активного шунтирующего фильтра мощности (SAPF), призванного снижать гармонические искажения

напряжения и тока, вызванные нелинейными нагрузками. Для улучшения управления переключением SAPF в условиях динамических и нелинейных нагрузок авторы применили нейросетевой подход, использующий теорию мгновенной реактивной мощности (IRP). Недостатком работы является ее узкая направленность на снижение гармонических искажений напряжения и тока.

Как показывает анализ рассмотренных литературных источников, практически отсутствуют работы, посвященные анализу влияния реальных производственных условий на работу распределительных сетей промышленных предприятий. Основное внимание исследователей привлекает проблема минимизации высших гармоник, действующих в распределительных сетях, тогда как в реальных производственных условиях задачи управления другими показателями качества электроэнергии могут стоять более остро. Для управления активными компенсирующими устройствами различного типа широко применяются как стандартные системы управления с ПИД-контроллерами, так и различные варианты нейросетевых и нечетких регуляторов.

Пробел в исследованиях. Анализ рассмотренных источников показывает, что исследования в области повышения качества электроэнергии сосредоточены преимущественно на активных силовых фильтрах (APF) и алгоритмах их управления. Вопросы применения управляемых реакторных компенсаторов с широтно-импульсным регулированием на высокой частоте во внутрицеховых сетях промышленных предприятий остаются практически неисследованными: отсутствуют математические модели, позволяющие оценить регулировочные характеристики таких компенсаторов при совместной работе с мощной активно-индуктивной нагрузкой.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в разработке принципиальных схем и математических моделей однофазного и трёхфазного управляемых реакторных компенсаторов на базе мостовых диодно-транзисторных ключей. Впервые установлена зависимость линейности регулировочной характеристики $Q = f(\gamma)$ от установленной ёмкости фильтра, что создаёт основу для синтеза замкнутых систем автоматического управления реактивной мощностью в узле нагрузки промышленного предприятия.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве основного средства обеспечения электромагнитной совместимости цеховых сетей электроснабжения с силовыми полупроводниковыми преобразователями широко распространены сравнительно несложные фильтрокомпенсирующие устройства на базе пассивных индуктивно-емкостных фильтров, которые обеспечивают как улучшение формы тока и напряжения сети, так и компенсацию реактивной мощности [7].

Основным недостатком наиболее распространенных пассивных фильтрокомпенсирующих устройств с фиксированными параметрами элементов является неуправляемость, что приводит при широком диапазоне регулирования нагрузок силовых полупроводниковых преобразователей к возникновению режимов как недокомпенсации реактивной мощности, так и ее перекомпенсации [7]. Такое обстоятельство обуславливает необходимость завышения установленной мощности генераторов и приводит к снижению эффективности и технико-экономических показателей цеховых сетей электроснабжения в целом. Указанные негативные факторы устраняются при использовании управляемых фильтрокомпенсирующих устройств, которые обеспечивают дополнительные преимущества: уменьшение потерь активной мощности и снижение колебаний напряжения сети.

Обобщенная схема цеховой сети электроснабжения с полупроводниковым преобразователем и управляемым фильтрокомпенсирующим устройством приведена на рис. 1. Генератор (сеть питания) представлен источником синусоидальной ЭДС e_S с амплитудой E_m и сопротивлением короткого замыкания X_S , трансформатор или входной реактор полупроводникового преобразователя - сопротивлением X_P . В состав управляемого фильтрокомпенсирующего устройства входит резонансный продольный LC-фильтр, состоящий из сопротивлений X_{L0} , X_{C0} и реакторный компенсатор, условно обозначенный регулируемым эквивалентным сопротивлением на основной гармонике ХРКЕ. Порядок частоты настройки резонансного фильтра соответствует нулю частотной характеристики системы и выбирается из условия:

$$\omega_{P\Phi 0} = \omega_{P\Phi 0} / \omega = \sqrt{X_{C0} / X_{L0}} = p - 1 \quad (1)$$

где $\omega_{P\Phi 0}$ – резонансная частота фильтра, ω – круговая частота сети, p – пульсность полупроводникового преобразователя. При снижении высших гармоник, резонансный фильтр одновременно является генератором реактивной мощности на основной гармонике.

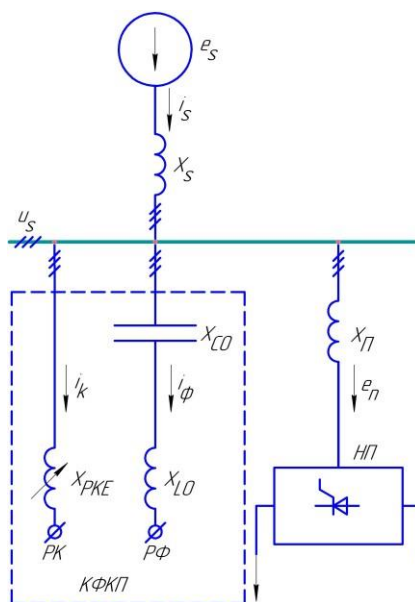


Рисунок 1 – Однолинейная структурная схема цеховой сети электроснабжения с полупроводниковым преобразователем и управляемым компенсирующим устройством

На практике наибольшее применение получила схема реактивного компенсатора, выполненная на основе реакторов с

индуктивностью L_K , включенных последовательно со встречно-параллельно соединенными однооперационными тиристорами с фазовым управлением (рис. 2) [8].

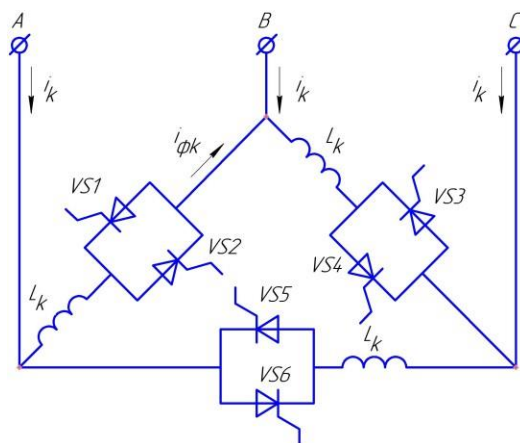


Рисунок 2 – Реакторный компенсатор с тиристорными ключами

Основными недостатками реакторного компенсатора (рис. 2) являются генерация НЧ гармоник тока в питающую сеть, а также существенное время задержки регулирования, составляющее половину периода.

Также могут быть использованы трехфазные реакторные компенсаторы с полупроводниковыми широтно-импульсными регуляторами на базе ключей переменного тока, схемы которых приведены на рис. 3, а, б [8, 10].

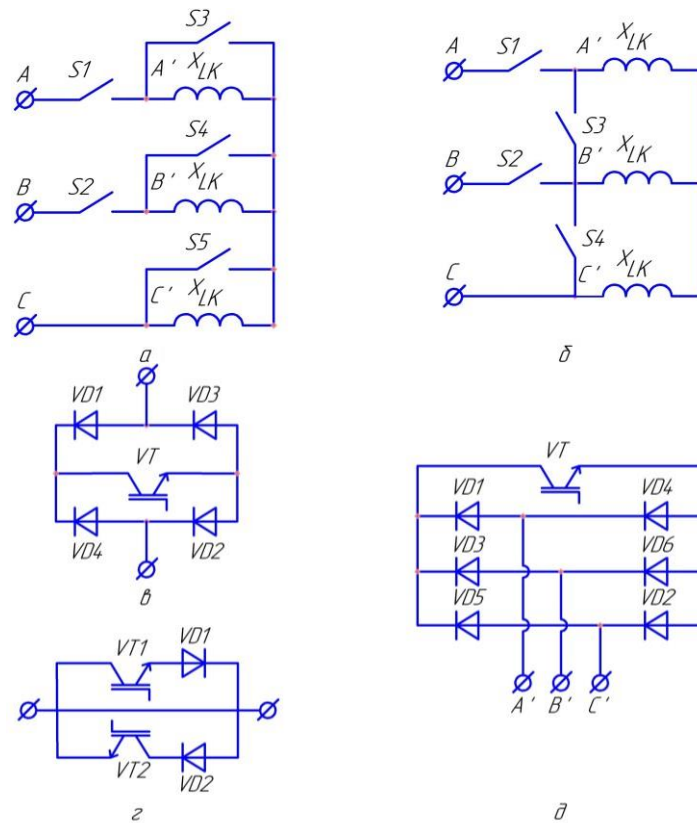


Рисунок 3 – Трехфазный реакторный компенсатор с полупроводниковым широтно-импульсным регулированием: а, б – основные структуры реакторного компенсатора, в, г – полупроводниковые ключи переменного тока, д – короткозамыкатель на одном полупроводниковом ключе постоянного тока

Полупроводниковые ключи переменного тока, выполненные на базе транзисторов и диодов, представлены на рис. 3, в, г. Вместо транзисторов могут быть использованы двухоперационные тиристоры. Вариант ключа на рис. 3, в, лучше, поскольку содержит меньшее количество управляемых элементов.

Наилучшими регулировочными характеристиками обладает быстродействующий

реакторный компенсатор с широтно-импульсным регулированием на высокой частоте (рис. 4) [8-10].

Основу схемы составляют три индуктивных элемента L_K и шесть полупроводниковых ключей переменного тока (1-6), условно представленных в виде контактов.

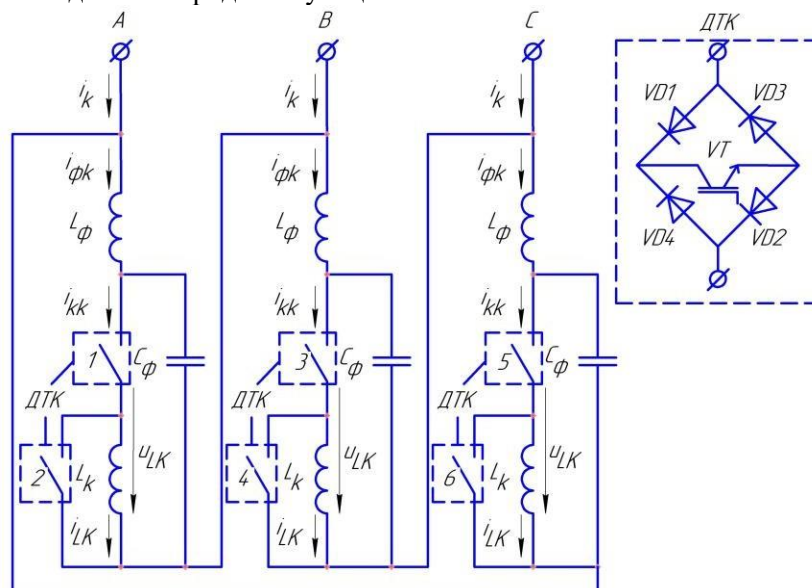


Рисунок 4 – Принципиальная схема трехфазного управляемого реакторного компенсатора

Ключевые элементы могут быть реализованы на базе мостовой диодно-транзисторной схемы (рис.

3, в). В диагональ моста вместо IGBT-транзисторов могут быть включены двухоперационные

тиристоры (GTO, IGCT). В каждой фазе такой схемы реакторного компенсатора имеются два ключа, которые работают в противофазе: один из них соединен последовательно, а другой - параллельно с LK.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования особенностей работы управляемого реакторного компенсатора и его регулировочных возможностей был использован метод математического моделирования. Математическая модель однофазного

управляемого реакторного компенсатора, разработанная с использованием MATLAB/Simscape/Electrical, представлена на рис.5.

Модель рис.5 содержит три однофазных компенсатора CRC, отличающихся значением установленной емкости фильтра СФ, рис.5, а. На рис.5, б, представлена модель внутренней структуры управляемого реакторного компенсатора, соответствующая принципиальной схеме, представленной на рис.4. Рисунок 5, в, представляет математическую модель мостового диодно-транзисторного ключа ДТК.

Представленная на рис.5, а математическая модель управляемого реакторного компенсатора позволяет изучить регулировочные характеристики управляемого реакторного компенсатора

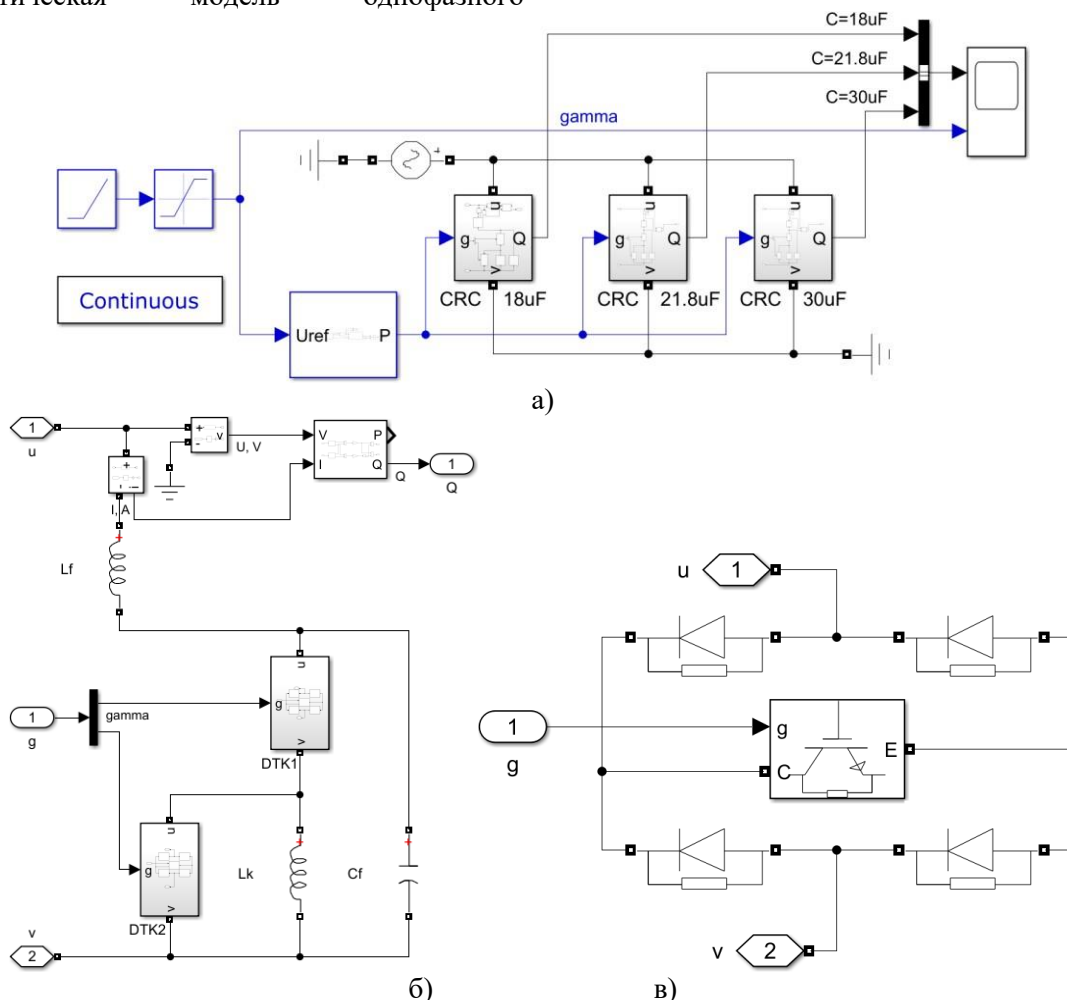


Рисунок 5 – Математическая модель управляемого реакторного компенсатора: а – схема включения управляемого реакторного компенсатора; б – внутренняя структура управляемого реакторного компенсатора; в – мостовой диодно-транзисторный ключ

Результаты работы модели управляемого реакторного компенсатора представлены на рис.6. Полученные результаты позволяют оценить регулировочную характеристику реакторного компенсатора $Q = f(\gamma)$ и ее

зависимость от установленной емкости фильтра СФ. Скважность сигнала управления мостового диодно-транзисторного ключа γ изменяется в диапазоне от -1 до 1 за период времени $0.3c \leq t \leq 1.7c$.

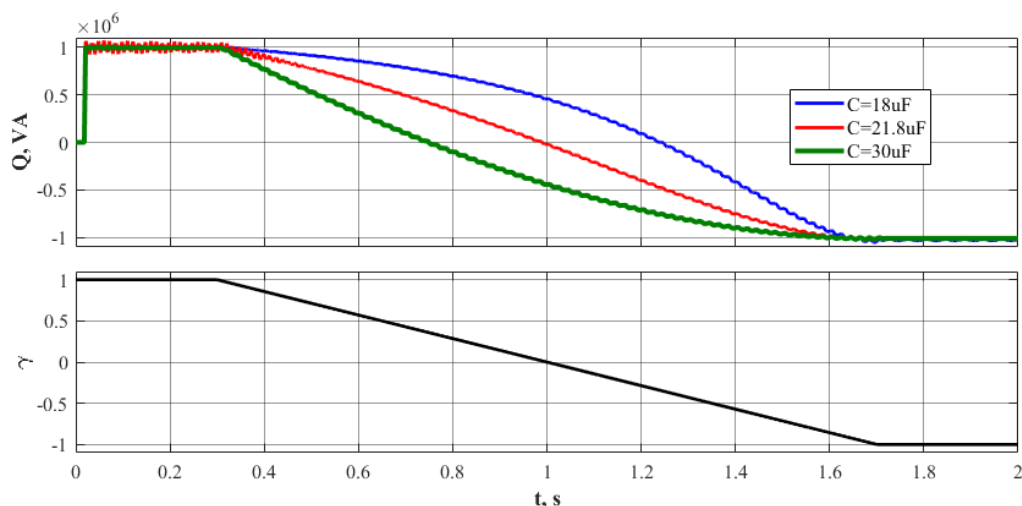


Рисунок 6 – Регулировочные характеристики управляемого реакторного компенсатора $Q = f(\gamma)$ при различных значениях установленной ёмкости фильтра

Как следует из полученных расчетных зависимостей, управляемый реакторный компенсатор обеспечивает плавное регулирование реактивной мощности в заданном диапазоне. Установлено, что существует такое значение емкости фильтра СФ, которое обеспечивает практически линейный характер регулировочной характеристики управляемого реакторного компенсатора, что особенно важно

при синтезе замкнутых систем управления реактивной мощностью.

Дополнительно было выполнено исследование работоспособности и регулировочных возможностей трехфазного управляемого реакторного компенсатора при работе в узле нагрузки параллельно с трехфазным асинхронным двигателем. Модель узла нагрузки, реализованная в MATLAB/Simscpe/Electrical, представлена на рис. 7.

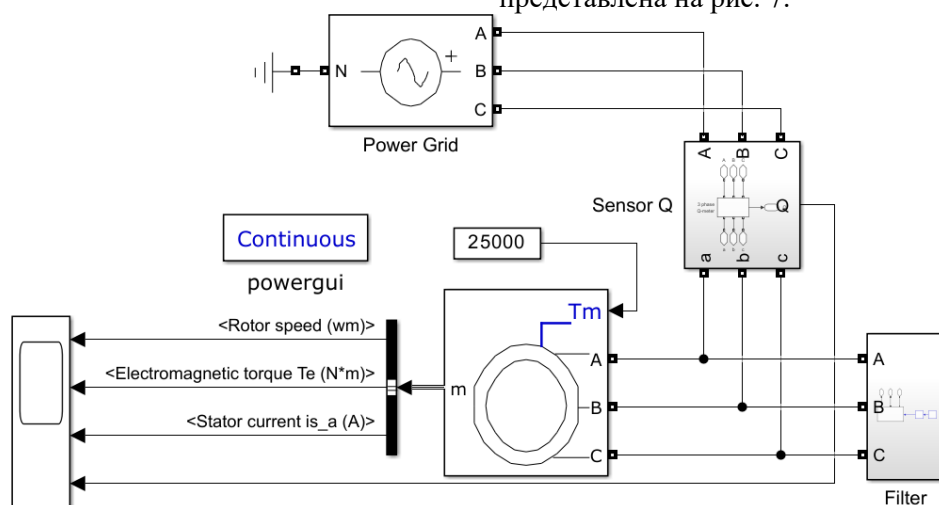


Рисунок 7 – Реализация модели узла нагрузки с трехфазным асинхронным двигателем и управляемым реакторным компенсатором Filter

Подсистема измерения реактивной мощности обозначена как Sensor Q.

В математической модели использован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 1RQ76366JA800CGO-Z SIMOTICS HV M со следующими техническими характеристиками: номинальная мощность 3500 кВт, напряжение питания 10 кВ, частота вращения 994 об/мин.

Сквозность сигнала управления мостового диодно-транзисторного ключа γ изменяется в диапазоне от -1 до 1 за период времени $1 \text{ с} \leq t \leq 3 \text{ с}$ при установившемся режиме работы асинхронного двигателя с номинальной нагрузкой.

Полученные результаты моделирования узла нагрузки представлены на рис.8.

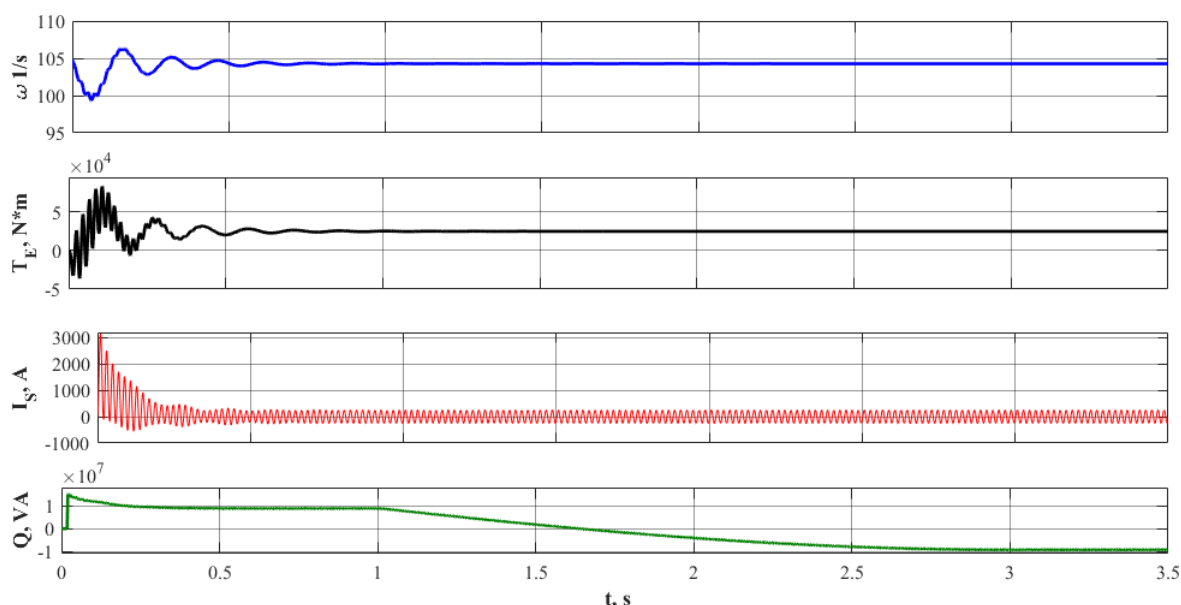


Рисунок 8 – Результаты моделирования узла нагрузки с асинхронным двигателем и управляемым реакторным компенсатором

Как следует из полученных результатов математического моделирования узла трехфазной нагрузки с асинхронным двигателем, управляемый реакторный компенсатор обеспечивает плавное регулирование реактивной мощности в широком диапазоне. Это создает предпосылки для создания системы автоматического управления реактивной мощностью в узле нагрузки, поддержания необходимого значения коэффициента мощности, обеспечения режима полной компенсации реактивной мощности активно-индуктивной нагрузки.

ВЫВОДЫ

В работе обоснована целесообразность применения управляемых реакторных компенсаторов с целью повышения качества напряжения во внутренних распределительных сетях промышленных предприятий. Управляемые реакторные компенсаторы могут быть выполнены с применением двухоперационных тиристоров (GTO, IGCT), что существенно снижает стоимость рассмотренного технического решения. Разработана математическая модель однофазного и трехфазного управляемого реакторного компенсатора. С помощью математического моделирования показана возможность плавного регулирования реактивной мощности в широком диапазоне.

Применение предложенного технического решения может улучшить показатели качества питающего напряжения во внутренних распределительных сетях промышленных предприятий, а именно снизить потребление реактивной мощности, снизить провалы напряжения в питающей сети.

Недостатком исследования является то, что не рассмотрена работа трехфазного управляемого реакторного компенсатора в реальной распределительной сети с учетом ограниченной мощности источника питания и сопротивления трансформаторов и соединительных линий.

В качестве направления дальнейших исследований планируется разработка замкнутых систем управления управляемого реакторного компенсатора с целью повышения качества напряжения во внутренних распределительных сетях промышленных предприятий.

Авторский вклад (таксономия CRediT):

Смайл А.А.: концептуализация, обзор литературных источников, проведение вычислительных экспериментов, написание первоначального варианта рукописи. **Смагулова К.К.:** разработка методологии исследования, анализ и интерпретация результатов моделирования. **А.О. Романец:** разработка математических моделей в MATLAB/SimScope/Electrical, визуализация результатов. **В.Д. Барановский:** разработка принципиальных схем реакторных компенсаторов, валидация технических решений. **М.Л. Барановская:** научное руководство исследованием, критическое редактирование и подготовка окончательной версии рукописи. Все авторы ознакомились с окончательной версией статьи и одобрили её к публикации.

Финансирование. Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллективам Карагандинского технического университета имени Абылкаса

Сагинова, Запорожского и Криворожского национальных университетов за научное сотрудничество при подготовке исследования.

Авторское право © 2026 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–

ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения той же лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Asit Mohanty, Prakash K. Ray, Soumya Ranjan Das, Manzoore Elahi M. Soudagar, S. Ramesh, T.M. Yunus Khan, Naif Almakayeel, M. Mahmood Ali, Muhammad Nasir Bashir. Enhancing power quality in contemporary utility systems: A comprehensive analysis of active power filters and control strategies, *Energy Reports*, 2024, Volume 11, Pages 5575-5592, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.03>.
- [2] Khairul Anuar Mohd Nor, Noramalina Abdullah, Power quality improvement of three-phase electrical systems using active-passive hybrid harmonic filter, *Results in Engineering*, 2024, Volume 22, 102242, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102242>.
- [3] Timothy Oluwaseun Araoye, Evans Chinemezu Ashigwuike, Adeyinka Cornelius Adeyemi, Sochima Vincent Egoigwe, Nnaemeka Genesis Ajah, Emmanuel Eronu. Reduction and control of harmonic on three-phase squirrel cage induction motors with voltage source inverter (VSI) using ANN-grasshopper optimization shunt active filters (ANN-GOSAF), *Scientific African*, 2023, Volume 21, e01785, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.202e01785>.
- [4] M. Karthikeyan, K. Sharmilee, P.M. Balasubramaniam, N.B. Prakash, M. Rajesh Babu, V. Subramaniaswamy, S. Sudhakar. Design and implementation of ANN-based SAPF approach for current harmonics mitigation in industrial power systems, *Microprocessors and Microsystems*, 2020, Volume 77, 103194, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103194>.
- [5] Abdallah El Ghaly, Mohamad Tarnini, Zaher Al Barakeh, Khaled Chahine, Compensating voltage waveform distortions using a practical topology of series active power filters, *Results in Engineering*, 2024, Volume 22, 102032, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102032>.
- [6] Annu Govind, Kuldeep Jayaswal, Vijay Kumar Tayal, Prakash Kumar, Simulation and real time implementation of shunt active power filter for power quality enhancement using adaptive neural network topology, *Electric Power Systems Research*, 2024, Volume 228, 110042. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.202110042>.
- [7] DIXON Juan, MORAN Luis, RODRIGUEZ José, DOMKE Ricardo. Reactive power compensation technologies: State – of – the – art review, *Proceedings of the IEEE* ISSN0018-9219, 2005, vol. 93, n 12, pp. 2144-2164.
- [8] Zhuk, O., Zhuk, D., Kryvoruchko, D., & D'yakonov, O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 605-610.
- [9] O. Zhuk, S. Trybulkevich, D. Zhuk, V. Ryabenkij Modelling of a FilterCompensating Device with a Controlled Reactor Compensator. 7th International Conference on Digital Technologies in Education, Science and Industry, DTESI 2022 October 20–21. Almaty. Kazakhstan. P. 313–324.
- [10] O. Zhuk, D. Zhuk, D. Kryvoruchko and S. Stepenko, "An improvement of compensators of complete power non-active components in autonomous electric power systems," 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, Ukraine, 2016, pp. 1-5.

REFERENCES

- [1] Asit Mohanty, Prakash K. Ray, Soumya Ranjan Das, Manzoore Elahi M. Soudagar, S. Ramesh, T.M. Yunus Khan, Naif Almakayeel, M. Mahmood Ali, Muhammad Nasir Bashir. Enhancing power quality in contemporary utility systems: A comprehensive analysis of active power filters and control strategies, *Energy Reports*, 2024, Volume 11, Pages 5575-5592, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.03>.
- [2] Khairul Anuar Mohd Nor, Noramalina Abdullah, Power quality improvement of three-phase electrical systems using active-passive hybrid harmonic filter, *Results in Engineering*, 2024, Volume 22, 102242, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102242>.
- [3] Timothy Oluwaseun Araoye, Evans Chinemezu Ashigwuike, Adeyinka Cornelius Adeyemi, Sochima Vincent Egoigwe, Nnaemeka Genesis Ajah, Emmanuel Eronu. Reduction and control of harmonic on three-phase squirrel cage induction motors with voltage source inverter (VSI) using ANN-grasshopper optimization shunt active filters (ANN-GOSAF), *Scientific African*, 2023, Volume 21, e01785, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.202e01785>.
- [4] M. Karthikeyan, K. Sharmilee, P.M. Balasubramaniam, N.B. Prakash, M. Rajesh Babu, V. Subramaniaswamy, S. Sudhakar. Design and implementation of ANN-based SAPF approach for current harmonics mitigation in industrial power systems, *Microprocessors and Microsystems*, 2020, Volume 77, 103194, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103194>.

[5] Abdallah El Ghaly, Mohamad Tarnini, Zaher Al Barakeh, Khaled Chahine, Compensating voltage waveform distortions using a practical topology of series active power filters, *Results in Engineering*, 2024, Volume 22, 102032, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102032>.

[6] Annu Govind, Kuldeep Jayaswal, Vijay Kumar Tayal, Prakash Kumar, Simulation and real time implementation of shunt active power filter for power quality enhancement using adaptive neural network topology, *Electric Power Systems Research*, 2024, Volume 228, 110042. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.202110042>.

[7] DIXON Juan, MORAN Luis, RODRIGUEZ José, DOMKE Ricardo. Reactive power compensation technologies: State – of – the - art review, *Proceedings of the IEEE* ISSN0018-9219, 2005, vol. 93, n 12, pp. 2144-2164.

[8] Zhuk, O., Zhuk, D., Kryvoruchko, D., & D'yakonov, O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 605-610.

[9] O. Zhuk, S. Trybulkevich, D. Zhuk, V. Ryabenkij Modelling of a FilterCompensating Device with a Controlled Reactor Compensator. 7th International Conference on Digital Technologies in Education, Science and Industry, DTESI 2022 October 20–21. Almaty. Kazakhstan. P. 313–324.

[10] O. Zhuk, D. Zhuk, D. Kryvoruchko and S. Stepenko, "An improvement of compensators of complete power non-active components in autonomous electric power systems," 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, Ukraine, 2016, pp. 1-5.