

# Адаптивный комплекс энергосбережения

Д. Самохин<sup>1</sup>

УДК 621.31 | ВАК 05.27.01

Сегодня очень важное значение в экономике имеет энергосбережение. Для того чтобы добиться сбережения электроэнергии, нужно улучшать ряд параметров, определяющих ее качество [1]. Существенную роль в вопросе экономии электрической энергии играет компенсация реактивной мощности (повышение коэффициента мощности). В статье рассматривается адаптивный комплекс энергосбережения (АКЭС), который позволяет эффективно решать эту задачу.

Электрическая мощность переменного тока характеризуется фазовым соотношением между током и напряжением. Фаза тока, отстающая от фазы напряжения, возникает из-за преобладания индуктивных нагрузок, тогда как фаза тока, опережающая фазу напряжения, появляется из-за емкостных нагрузок. Синфазное соотношение напряжения и тока возможно или при чисто резистивных нагрузках или при балансе индуктивных и емкостных нагрузок. Обычно используемой мерой фазового соотношения между током и напряжением является коэффициент мощности, который равен косинусу фазового угла между ними или между активной и реактивной мощностями. Коэффициент мощности достигает единицы, когда отсутствует сдвиг фаз между током и напряжением в сети [2].

На практике обычно преобладают индуктивные нагрузки, такие как дроссели, электродвигатели, трансформаторы, соединенные с линиями электропередачи. В цепях, имеющих реактивные нагрузки, коэффициент мощности меньше единицы. Реактивная мощность не потребляется как таковая в нагрузке, она доставляется в энергосистему и возвращается в источник. Соответственно, линии электропередач и кабельные сети должны пропускать больше тока, чем необходимо, чтобы обеспечить питание сети распределения электроэнергии, имеющей реактивные нагрузки. Дополнительный ток может привести к дополнительным реальным потерям мощности, вызванным потерями в линиях электропередач и кабельных сетях, что требует от генерирующих устройств увеличения мощности и, соответственно, увеличения стоимости вырабатываемой электроэнергии. Повышенная загрузка сетей реактивным током приводит также к понижению напряжения в сети, а резкие колебания реактивной мощности – к колебаниям напряжения в сети.

Существует много решений, известных в данной области техники для компенсации реактивной мощности

в энергосистемах предприятий. При этом преимущественно для компенсации используются следующие средства: шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы типа СТАТКОМ и компенсаторы, выполненные с использованием батарей шунтирующих косинусных конденсаторов.

Устройства компенсации реактивной мощности [3], выполненные на базе перестраиваемых шунтирующих реакторов, имеют ряд недостатков: низкая технологичность, большие габариты, а также низкая надежность в эксплуатации.

В устройствах автоматической компенсации реактивной мощности, выполненных на базе управляемых тиристорно-реакторных групп с фильтрами высших гармоник (СТАТКОМ) [4], частично устранены указанные выше недостатки. Однако недостатками такого устройства являются высокая стоимость, значительное потребление активной мощности и высокий уровень гармоник, источником которых является СТАТКОМ.

Наиболее перспективными в сетях напряжением до 0,4 кВ являются устройства автоматической компенсации реактивной мощности, выполненные на базе батарей коммутируемых косинусных конденсаторов.

Основными преимуществами использования батарей косинусных конденсаторов в устройствах энергосбережения являются небольшие удельные потери активной мощности косинусных конденсаторов, отсутствие механически перемещаемых частей в процессе эксплуатации, простота монтажа и эксплуатации и относительная простота управления коммутацией.

На сегодняшний день как в России, так и за рубежом производится большое количество компенсаторов положительной реактивной мощности, как неуправляемых (КРМ), так и управляемых (УКРМ). К наиболее известным из их производителей относятся такие фирмы, как Siemens, Schneider Electric и др.

Тем не менее, производимая ими продукция обладает рядом недостатков. Основными из них являются низкая надежность и относительно большие ступени регулирования (компенсирования) реактивной мощности.

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (НИУ МИЭТ), Институт микроприборов и систем управления, старший преподаватель, [opozitel984@mail.ru](mailto:opozitel984@mail.ru).

Низкая надежность обусловлена частым выходом из строя конденсаторов и коммутирующих устройств. Использование вместо контакторов мощных симисторов частично решает проблему коммутации, но приводит к большим собственным потерям в компенсаторах и требует установки вентиляторов для их охлаждения.

В указанных выше компенсаторах используются, как правило, трехфазные конденсаторы на реактивную мощность 50, 25 и 10 кВАр. Их применение дает возможность, с одной стороны, повысить коэффициент использования конденсаторов, но, с другой стороны, снижает надежность системы, точность регулирования и не позволяет «подстраиваться» под каждую фазу, а только под одну. Практика показывает, что значения реактивной мощности в фазах зачастую существенно различаются.

Автором предлагается адаптивный комплекс энергосбережения (АКЭС), который компенсирует реактивную мощность отдельно и независимо по каждой фазе, что позволяет получить более глубокую компенсацию и, соответственно, больший экономический эффект.

Тем не менее, только компенсацией реактивной мощности невозможно достичь высокого экономического эффекта. Для его повышения необходимо, в частности, снизить в сети высшие гармоники.

На рынке существуют фильтры гармоник различного типа. Это независимые устройства, которые продаются либо отдельно, либо устанавливаются внутри шкафа компенсатора реактивной мощности. При установке фильтров гармоник в УКРМ, как правило, необходимо осуществлять процедуры по согласованию их совместной работы. Такая совокупность компенсаторов и фильтров приводит к существенному удорожанию устройства. Кроме того, существующие фильтры гармоник заранее настроены на определенные частоты, а гармонический состав в сети предприятий в процессе их работы может постоянно меняться, поэтому желательно иметь управляемые фильтры гармоник.

Существенный вклад в экономию электрической энергии вносит снижение перекосов напряжений. На сегодняшний день компенсация перекосов напряжений может осуществляться однофазными или трехфазными стабилизаторами напряжения или симметрирующими трансформаторами. Но эти устройства имеют высокую цену и массогабаритные характеристики, такие же, как питающие силовые трансформаторы, и включаются в разрыв систем энергоснабжения предприятия, чем изменяют конфигурацию сети и снижают ее надежность.

В результате, при построении систем энергосбережения из существующих УКРМ, фильтров и, например, симметрирующих трансформаторов, получается дорогой и громоздкий комплекс, требующий согласования работы его отдельных частей и имеющий ограниченные возможности по энергосбережению.

Таким образом, для эффективного решения задачи энергосбережения необходимо:

- разработать адаптивную систему компенсации реактивной мощности по каждой фазе отдельно;
- найти принципиально новый подход к компенсации перекосов напряжений без использования стабилизаторов напряжения и симметрирующих трансформаторов;
- разработать управляемые фильтры гармоник;
- реализовать адаптивную компенсацию реактивной мощности, компенсацию перекосов напряжений и управляемую фильтрацию высших гармоник как единое оригинальное техническое решение.

Для решения указанных выше проблем разработан адаптивный комплекс энергосбережения (АКЭС), структурная схема которого представлена на рис. 1.

Адаптивный компенсатор реактивной мощности, управляемый фильтр гармоник и компенсатор реактивной мощности представляют собой единое оригинальное техническое решение.

Схема работает следующим образом: на вход измерителя параметров сети (ИПС) через блок защиты (БЗ) из сети поступают мгновенные значения напряжений  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$ . На другой вход измерителя параметров сети

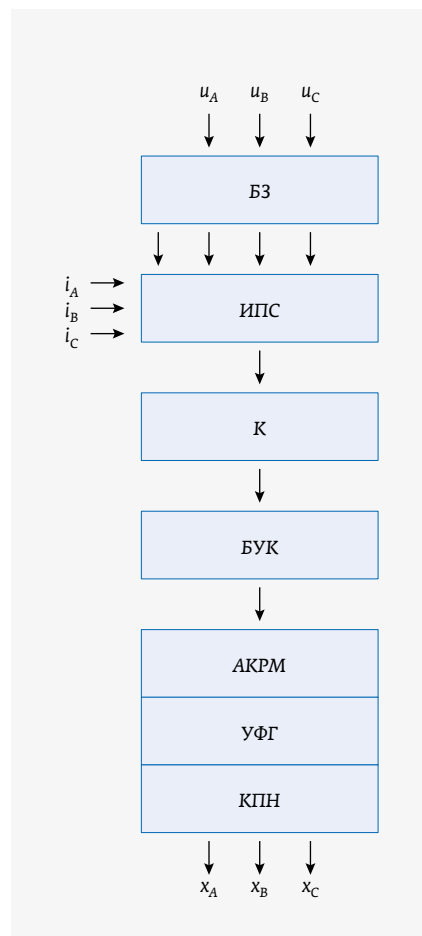


Рис. 1.

Структурная схема адаптивного комплекса энергосбережения. БЗ – блок защиты; ИПС – измеритель параметров сети; К – контроллер; БУК – блок управления и коммутации; АКРМ – адаптивный компенсатор реактивной мощности; УФГ – управляемый фильтр гармоник; КПН – компенсатор перекоса напряжений;  $x_A$ ,  $x_B$ ,  $x_C$  – выходные сопротивления АКЭС по фазам А, В, С

от измерительных трансформаторов тока поступают мгновенные значения токов  $i_A, i_B, i_C$ . Измеритель параметров сети обрабатывает поступающие на его входы сигналы и выдает на выходе действующие значения по трем фазам токов  $I_A, I_B, I_C$  и напряжений  $U_A, U_B, U_C$ , определяемым соответственно по соотношениям:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt},$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt};$$

сдвиги по фазе между токами и напряжениями  $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ ; коэффициенты мощности по всем фазам  $\cos \varphi_A, \cos \varphi_B, \cos \varphi_C$  (и их среднеарифметическое значение  $\cos \varphi_{cp}$ ); гармонический состав токов и напряжений; активные мощности по всем фазам  $P_A, P_B, P_C$  и суммарную активную мощность  $P_\Sigma$ ; реактивную мощность по всем фазам  $Q_A, Q_B, Q_C$  и суммарную  $Q_\Sigma$ ; перекос напряжений

$$\delta_u = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}} \cdot 100\%,$$

где  $U_{\max} = \max(U_A, U_B, U_C)$ ,  $U_{\min} = \min(U_A, U_B, U_C)$ ; коэффициент гармоник по напряжению

$$K_{\Gamma U} = \frac{\sqrt{\sum U_k^2}}{U_1} \cdot 100\%$$

и другие параметры.

Контроллер (К), с использованием записанной в нем программы, считывает значения параметров сети и выдает команды по компенсации реактивной мощности (блок АКРМ), фильтрации высших гармоник (блок УФГ), компенсации перекосов напряжений (блок КПН). Контроллером вырабатываются команды управления батареями косинусных конденсаторов индивидуально для каждой из фаз (в отличие от группового управления в конденсаторных установках).

Подключение батарей косинусных конденсаторов по каждой из фаз в устройстве АКЭС осуществлено через итеративный трансформатор, что обеспечивает их дополнительную защиту от перегрузок, как по напряжению, так и по току.

Обеспечение многосторонней защиты косинусных конденсаторов в устройстве АКЭС позволило сократить их габаритные размеры и увеличить число ступеней коммутации, что дало возможность значительно увеличить точность компенсации реактивной мощности по сравнению с современными управляемыми конденсаторными установками [1].

Кроме того, в устройствах АКЭС по программе контроллера производится анализ гармонического состава напряжения электрической сети и вырабатываются команды коммутации для управляемого фильтра гармоник.

При этом, в отличие от фазокомпенсирующих устройств, управляемые фильтры гармоник устройств АКЭС автоматически адаптируют свою настройку к изменению гармонического состава сетевого напряжения (например, в связи с включением вновь приобретенного мощного оборудования с нелинейным вентильным преобразователем с изменяемым углом отсечки), при этом подавление гармоник может превышать 80%.

Устранение перекося фаз в устройствах АКЭС обеспечивается блоком «межфазных» конденсаторов. Он работает таким образом, что при перекося фазных (линейных) напряжений сети происходит смещение нулевой точки конденсаторной батареи, что в свою очередь приводит к изменению положения векторов токов конденсаторов и их величин. В результате этого вектор тока конденсаторной батареи, подключенной к «перегруженной» фазе, уменьшается, а угол между ним и вектором тока нагрузки соответствующей фазы увеличивается, что приводит к уменьшению соответствующего тока сети. Вектор тока конденсаторной батареи, подключенной к «недогруженной» фазе, увеличивается, а угол между ним и вектором тока нагрузки уменьшается, что приводит к увеличению тока сети данной фазы. Таким образом, значения токов в фазах сети выравниваются и, как следствие, выравниваются фазные и линейные напряжения сети.

Схема программы адаптивной компенсации реактивной мощности представлена на рис. 2. Схема работает следующим образом.

После запуска («НАЧАЛО») с измерителя параметров сети считываются фазные напряжения  $U_A, U_B, U_C$  (блок 1). Далее с заданным временным интервалом трехкратно осуществляется проверка устойчивого превышения напряжениями допустимых значений  $U_{\text{доп}}$  (блоки 2, 3, 4, 5). Если превышение имеется, на табло устройства идет сообщение о перенапряжении в сети и цикл измерения напряжения повторяется (блок 5). Если перенапряжения нет, то с измерителя параметров считываются значения фазных токов ( $I_A, I_B, I_C$ , блок 6).

Далее идет проверка токов на превышение допустимых значений (блок 7). Если есть превышение, то оператору приходит сообщение о перегрузке сети по току (блок 8), но устройство продолжает работать, так как после дальнейшей компенсации реактивной мощности токи снизятся и могут стать ниже допустимых значений  $I_{\text{доп}}$ .

После этого считывается с измерителя параметров сети реактивная мощность фазы А ( $Q_A$ , блок 9). В блоке 10 проверяется знак реактивной мощности. Если он отрицательный ( $Q_A < 0$ ), то в блоке 12 проверяется модуль реактивной мощности. Если он меньше минимального значения ( $Q_{\text{min}}$ ), то по фазе А нет необходимости включать компенсирующие конденсаторы и система переходит к анализу наличия реактивной мощности в фазе В.



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АО НПП ЭСТО (Группа компаний ЭСТО) - объединение ведущих российских предприятий, специализирующихся на разработках, производстве, модернизации, продаже и сервисном обслуживании специального технологического оборудования.

### Направления деятельности группы «ЭСТО»

Разработка и производство технологического оборудования (лазерное, вакуумное, сборочное, нестандартное) и внедрение технологий

Организация поставок как отдельных единиц зарубежного технологического оборудования, так и комплексных законченных технологий «под ключ»

Комплексная и частичная модернизация российского и зарубежного технологического оборудования любой сложности

Сервисное обслуживание российского и зарубежного технологического оборудования

Проектирование и строительство производств микроэлектроники

Обучение специалистов заказчика

Технологический аудит производства

Группа компаний ЭСТО более 20 лет производит оборудование для микроэлектроники в собственном инженерно-производственном комплексе метражом в 5000 кв.м в г. Зеленограде

Акционерное общество  
«Научно-производственное  
предприятие «Электронное  
специальное технологическое  
оборудование»

124460, Москва, Зеленоград,  
просп. Георгиевский, д. 5, стр. 1  
тел.: (499) 729-77-51,  
(499) 479-12-39  
info@nppesto.ru  
www.nppesto.ru





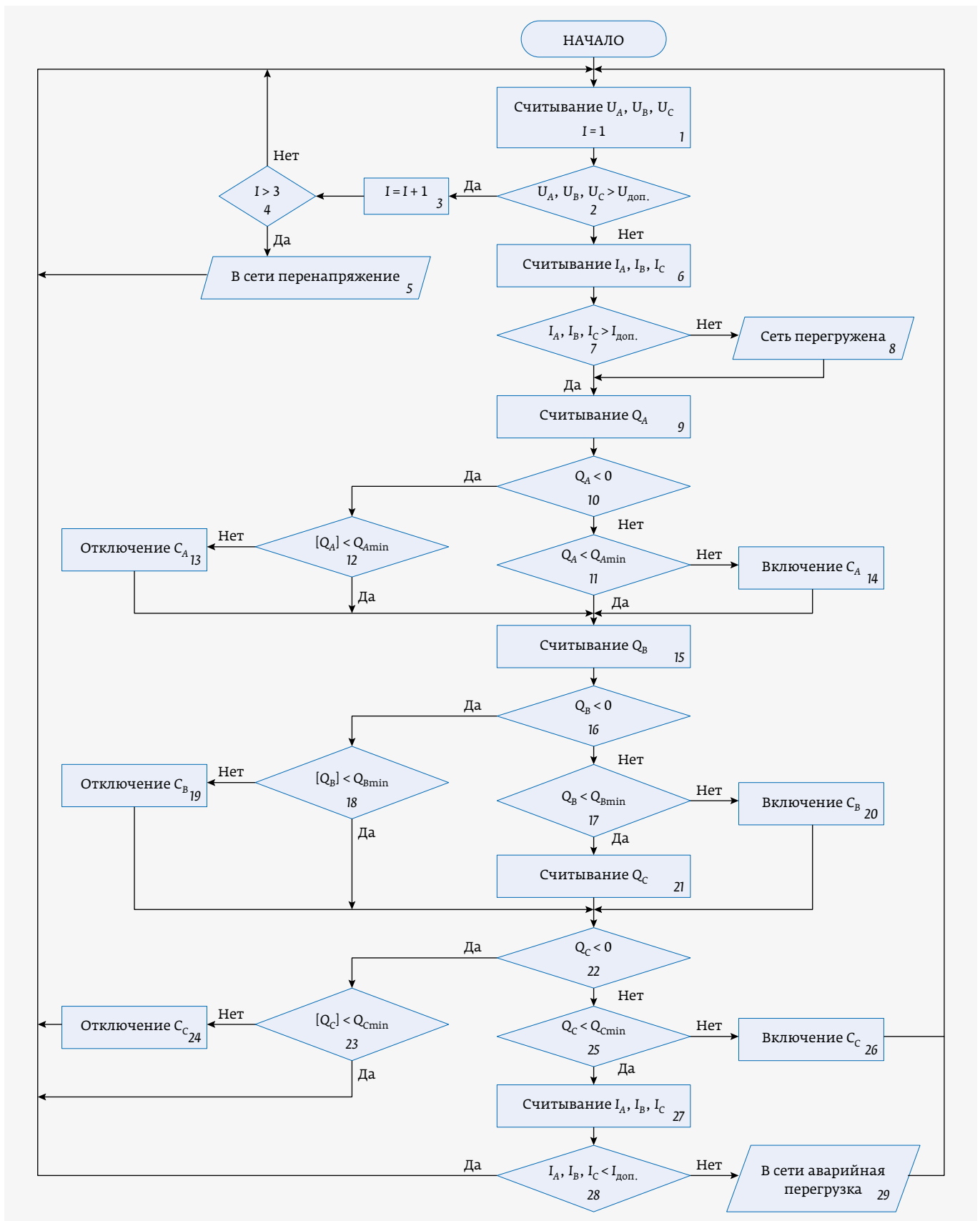


Рис. 2. Схема программы адаптивной компенсации реактивной мощности

**20** ЛЕТ  
СОЗДАЕМ  
ИННОВАЦИИ



## STE ICP200

- ICP-RIE
- RIE
- ICP PECVD
- PECVD

Универсальная технологическая платформа для проведения процессов плазмохимического травления и осаждения на подложках до Ø200 мм



 **SemiTEq**

Закрытое акционерное общество  
«Научное и технологическое оборудование»

ЗАО «НТО»  
пр. Энгельса, 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия  
Тел.: +7 812 601 06 05, факс: +7 812 313 54 29  
sales@semiteq.ru [www.semiteq.ru](http://www.semiteq.ru)

Если (блок 12) реактивная мощность по модулю больше  $Q_{\min}$ , отключается один из конденсаторов по фазе А и система идет к проверке фазы В. Если (блок 10) было выявлено, что реактивная мощность положительная, то в блоке 11 она проверяется на превышение минимального значения. Если реактивная мощность больше  $Q_{\min}$ , то в фазе А подключается один из конденсаторов (блок 14) и далее идет проверка фазы В. Если после проверки величины реактивной мощности в блоке 11 оказалось, что она меньше минимального выбранного значения, то система также переходит к анализу реактивной мощности фазы В.

Анализ реактивной мощности и принятия мер по подключению или отключению компенсирующих конденсаторов в фазах В и С происходит аналогично.

После выхода комплекса на режим полной компенсации реактивной мощности по всем фазам, когда во всех фазах она стала скомпенсированной, считываются фазные токи (блок 27) и далее идет проверка на превышение ими допустимых значений (блок 28). Если превышение есть, то оператору идет сообщение об аварийной ситуации

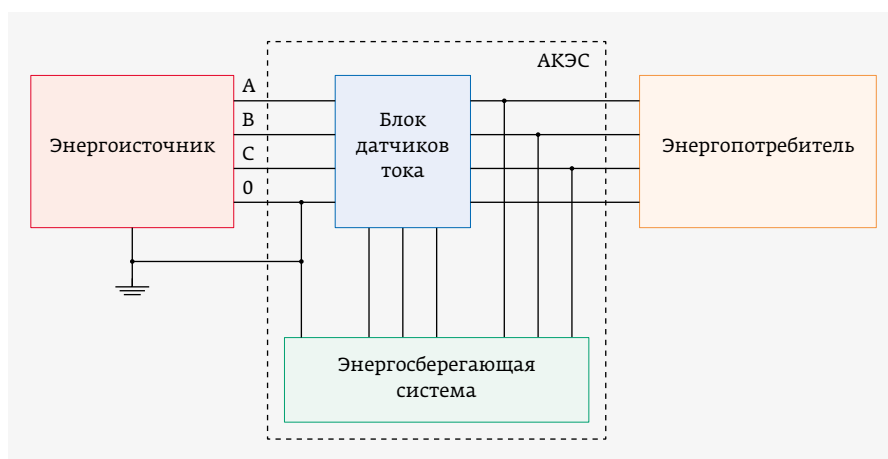


Рис. 3. Схема подключения устройства АКЭС к сети предприятия

в сети (блок 29) и система идет на повтор цикла. Если превышения нет, то система также идет на повтор цикла.

Следует заметить, что, в отличие от решения с включением симметрирующего трансформатора (или стабилизаторов напряжения), в устройствах АКЭС симметрирование осуществляется без разрыва сети (рис. 3), что значительно повышает надежность энергоснабжения предприятия.

Кроме того, устройство АКЭС обеспечивает выполнение дополнительных функций – защиту от кратковременных пиков и провалов напряжения, а также защиту от пусковых токов.

Как показали испытания устройств АКЭС, их использование на предприятиях позволяет экономить свыше 15% активной электроэнергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Самохин В. И., Самохин Д. В., Сухоставский И. В., Бабкин Е. Е. Основные направления энергосбережения на предприятиях и оборудование, используемое для энергосбережения // Электронные информационные системы. 2020. № 1(24). С. 63–76.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 9-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 1996. 638 с.
3. Патент № 2280934 от 27.07.2006 Российская Федерация, МПК H02J 3/18. Трехфазный компенсатор реактивной мощности и способ управления им / Л. Э. Рогинская, А. В. Стыскин, А. А. Караваев; Патентообладатели: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (RU). Заявл. 28.04.2008; опубл. 27.09.2009.
4. Николаев А. В. Разработка принципов управления статическим компенсатором (статком) и исследование его работы на подстанциях переменного и постоянного тока. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2005. 161 с.

## ООО «Руднев-Шиляев»

- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

### Инструментальные решения задач заказчика!

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35  
www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru  
тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368



# ИНФОПРОСТРАНСТВО ФЕССИОНАЛОВ



ТЕХНОСФЕРА

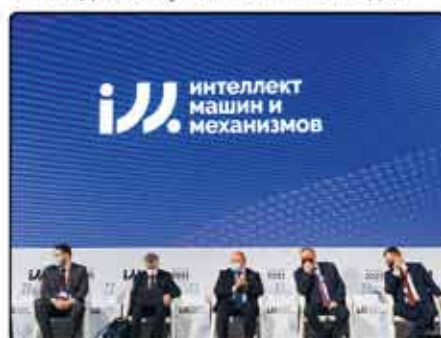
## Мы на YouTube

Подписывайтесь



ГЛАВНАЯ

Последние опубликованные видео



Пленарное заседание промышленного форума «Интеллект машин и механизмов 2021» в Севастополе



ООО НПП «Прима»: как достичь высокого качества при сборке, влагозащите и удалении покрытий



Аппаратно-программные решения для систем искусственного интеллекта и другие разработки НТЦ «Модуль»



Завод «Элеконд» для коллектива – второй дом



Российское оборудование для изготовления микросхем (НТО)