

## Выбор схемы поперечно подключаемого активного фильтра с функцией компенсации кратковременных прерываний напряжения<sup>1</sup>

- Кошелев К. С.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, Объединённый институт высоких температур Российской АН, Москва
- Алексеев Н. А., АО “НТЦ Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы”, Москва
- Карпов В. Н., канд. техн. наук, АО “НТЦ Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы”, Москва
- Матинян А. М., канд. техн. наук, АО “НТЦ Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы”, Москва
- Пешков М. В., канд. техн. наук, АО “НТЦ Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы”, Москва

Рассмотрены схемы модульных многоуровневых преобразователей, перспективных для создания активного фильтра с функциями компенсации реактивного тока нагрузки, её симметрирования, фильтрации токов высших гармоник и кратковременного электроснабжения нагрузки в паузе автоматического повторного включения (АПВ). Проведено сравнение схем распределённого и сосредоточенного подключения накопителя энергии, выполненного на базе суперконденсаторов. Показано, что схема с сосредоточенным накопителем предпочтительна за счёт более простого способа увеличения ёмкости накопителя и меньшей установленной энергоёмкости накопителей.

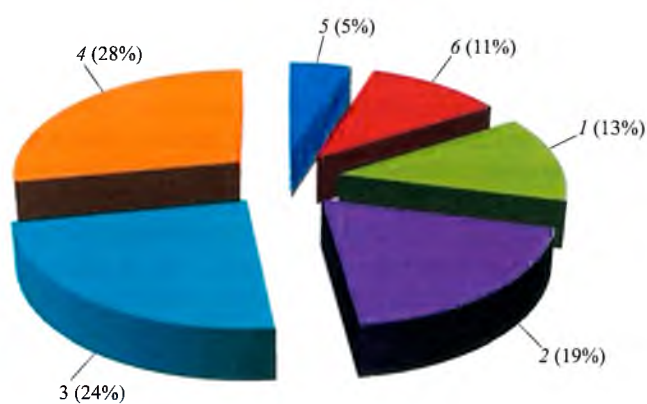
**Ключевые слова:** модульный многоуровневый преобразователь, накопитель энергии, распределённый суперконденсатор, сосредоточенный суперконденсатор.

Пониженное качество электроэнергии по различным оценкам [1 – 3] приводит к ущербу в разных странах от 0,2 до 0,4% ВВП. Распределение ущерба по видам показателей качества электроэнергии, по данным европейских исследований [2, 3], показано на рис. 1. На долю отклонений, провалов и кратковременных прерываний напряжения приходится 37% ущерба, ещё 16% ущерба обусловлены несимметрией напряжения и искажением синусоидальности кривой напряжения (гармониками), при этом основная доля ущерба относится к промышленным потребителям.

При необходимости улучшения качества электроэнергии одновременно по нескольким показателям широкое распространение получили активные фильтры (АФ) – устройства на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей [3]. В настоящее время под термином “активные фильтры” понимают группу устройств, различающихся по способу подключения (продольные/поперечные/продольно-поперечные), топологии используемого преобразователя (flying

capacitor, neutral point clamped, modular multilevel), функциям (фильтрация гармоник и/или несимметрии и/или реактивного тока) и алгоритмам регулирования, но имеющих общее свойство – использование полностью управляемых полупроводниковых силовых ключей [4].

Активные фильтры были предложены в 70-х годах прошлого века, однако до 2000-х годов в

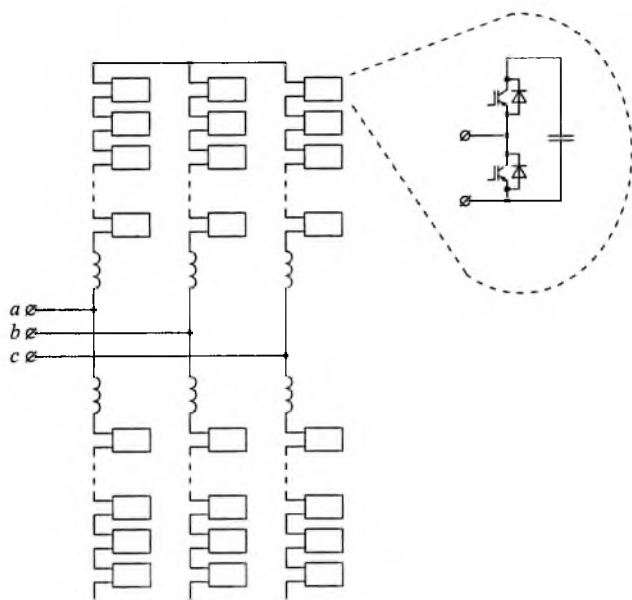


**Рис. 1. Распределение ущерба в зависимости от качества электроэнергии:**

1 – кратковременные прерывания напряжения; 2 – длительные прерывания напряжения; 3 – провалы напряжения; 4 – перенапряжения; 5 – искажения синусоидальности кривой напряжения (гармоники); 6 – прочие

<sup>1</sup> Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение 14.604.21.0178 от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60417X0178).

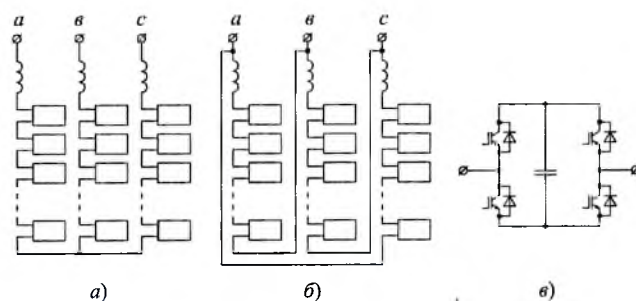
<sup>2</sup> Кошелев Константин Сергеевич: Ko-Ko-C@mail.ru



**Рис. 2.** Пример схемы модульного многоуровневого преобразователя на полумостовых модулях

мире выпускались только низковольтные АФ мощностью до нескольких мегаватт. Создание мощных высоковольтных АФ стало возможным с появлением новых схем преобразователей напряжения (ПН). Направление модульных многоуровневых преобразователей активно развивается на протяжении последних 10 лет и в настоящее время на базе данного типа преобразователей выполнено более 15 передач постоянного тока и компенсаторов реактивной мощности [5]. Модульная конструкция (рис. 2) позволяет создавать высоковольтные вентили без непосредственного последовательного соединения силовых полупроводниковых приборов, что повышает точность формирования тока преобразователя при пониженной частоте коммутации единичных полупроводниковых приборов (50 – 1200 Гц) [6] и делает данную технологию за счёт меньших коммутационных потерь привлекательной не только для передач и вставок постоянного тока, но и для активных фильтров в широком смысле. В сетях среднего и высокого класса напряжения у модульных многоуровневых преобразователей по сравнению с “классическими” двух- и трёхуровневыми ПН есть ещё одно преимущество – возможность подключения к сети без согласующего трансформатора, т.е. напрямую. Поэтому далее рассматриваются исключительно модульные многоуровневые преобразователи.

С помощью активных фильтров, выполненных на базе модульного многоуровневого преобразователя, можно компенсировать реактивную мощность и токи высших гармоник нагрузки, а также – токи обратной последовательности. Использование перечисленных функций позволяет повысить качество электроэнергии по следующим параметрам: отклонение напряжения, несимметрия напря-



**Рис. 3.** Схемы модульных многоуровневых компенсаторов на полномостовых модулях

жений, искажение синусоидальности (высшие гармоники токов и напряжений), фликер. Если необходима компенсация токов обратной последовательности, применяются, как правило, схемы соединения фаз преобразователя либо в две звезды (рис. 2) [7], либо в треугольник (рис. 3, б) [8]. Соединение фаз в звезду (рис. 3, а) обладает ограниченной способностью компенсации тока обратной последовательности [8] и поэтому далее не рассматривается. При соединении фаз в звезду или в треугольник обычно используются полномостовые модули ПН (рис. 3, в).

Спектр функций АФ может быть дополнительно расширен за счёт подключения к преобразователю накопителя энергии. Например, комплекс из преобразователя, накопителя и быстродействующего автоматического включения резерва (АВР) позволяет сократить длительность провала напряжения до 0,02 – 0,06 мс и обеспечить автономное питание нагрузки от преобразователя.

В качестве накопителей энергии в электроустановках мегаваттного класса могут выступать аккумуляторные батареи либо батареи суперконденсаторов. Использование суперконденсаторных накопителей энергии оправдано, когда требуется кратковременная выдача мощности (в течение единиц секунд) [10 – 12].

Подобные режимы востребованы, например, во время паузы АПВ линии электропередачи, к которой подключена удалённая нагрузка через единственную питающую линию. В подобных случаях даже при успешном АПВ линий 220 кВ и ниже нагрузка будет обесточиваться на время бестоковой паузы, что может приводить к опрокидыванию двигателей и другим отрицательным последствиям, сопряжённым с остановкой непрерывных технологических процессов и убытками. Оснащение подстанции устройством, питающим нагрузку в паузе АПВ, позволит снизить частоту отключений до случаев неуспешного АПВ даже при питании от единственной питающей линии.

Необходимо отметить, что АФ с дополнительной функцией питания автономной нагрузки должен быть выполнен на полную мощность нагрузки, и поэтому в данной статье гибридные схемы фильтров не рассматриваются, поскольку их ак-

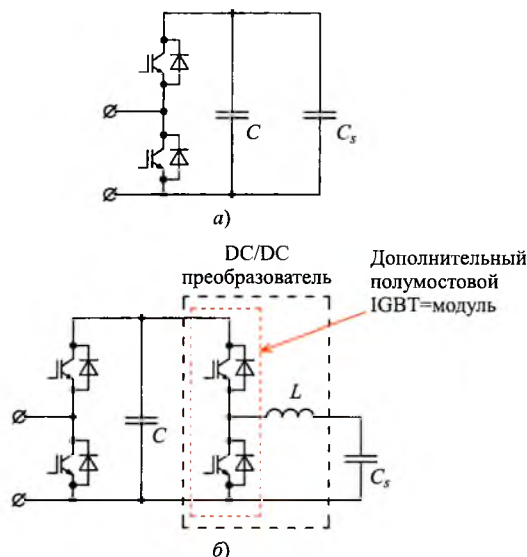


Рис. 4. Схемы присоединения суперконденсаторного накопителя к полумостовому модулю:

$C$  – низкоиндуктивный конденсатор;  $C_s$  – суперконденсатор

тивная часть выполняется из расчёта компенсации только токов высших гармоник и, как правило, её мощность существенно ниже полной мощности нагрузки [4].

Далее в статье приведено краткое описание нескольких вариантов схем многоуровневых преобразователей для поперечно подключаемых АФ с функциями компенсации реактивного тока нагрузки, её симметрирования, фильтрации токов высших гармоник и кратковременного электроснабжения нагрузки в паузе АПВ; проведены оценочные расчёты требуемого количества комплектующих для создания устройства и выбран оптимальный вариант с минимальным числом комплектующих при прочих равных параметрах.

**Способы интеграции накопителей энергии и ПН для АФ.** Множество схем накопителей энергии модульных многоуровневых преобразователей могут быть разделены на два основных типа – распределённые и сосредоточенные. Первый тип широко освещён [13 – 17], однако второй тип, как показано далее, обладает преимуществами по сравнению с распределённым накопителем.

В распределённых схемах накопителя энергии интегрированы в модули преобразователя. На рис. 4 показаны распространённые варианты присоединения накопителей к полумостовому модулю. В варианте, изображённом на рис. 4, а, суперконденсаторный накопитель  $C_s$  присоединяется параллельно низкоиндуктивному конденсатору  $C$  модуля. При данном способе подключения накопителя можно либо минимизировать требуемое число модулей, либо максимизировать коэффициент использования ёмкости накопителя. В первом случае ограничиваются относительно неглубоким изменением напряжения на конденсаторе (порядка

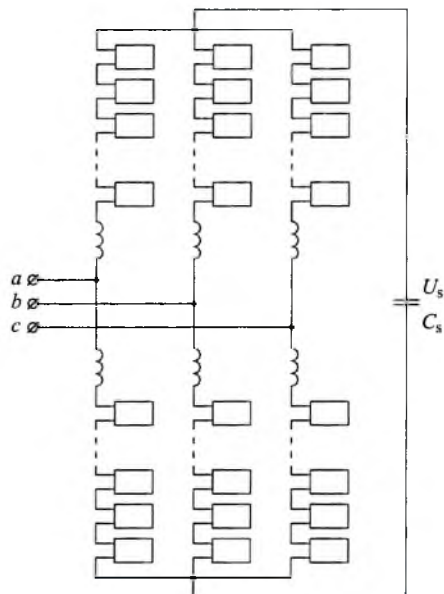


Рис. 5. Схема подключения сосредоточенного накопителя энергии:

$C_s$  – суперконденсатор;  $U_s$  – напряжение на суперконденсаторе

10%) при его разряде во время питания автономной нагрузки. В результате при разряде высвобождается только 19% запасённой в накопителе энергии. Во втором случае, как правило, задаются разрядом накопителя до половины первоначального напряжения, что соответствует высвобождению 75% запасённой энергии, но обуславливает двукратное увеличение числа модулей.

Компромиссное решение данной проблемы возможно за счёт применения DC/DC-преобразователя для обеспечения стабильного напряжения на конденсаторе  $C$  и глубокого разряда накопителя  $C_s$  (рис. 4, б). Недостатком данной схемы является необходимость дополнительного реактора и полумостового IGBT-модуля.

Основным преимуществом распределённых накопителей энергии является возможность использования всех наиболее распространённых схем соединений фаз преобразователя – звезда, треугольник, две параллельные звёзды. Главным недостатком всех распределённых накопителей заключается в увеличении габаритов модуля с ростом энергоёмкости, что существенно ограничивает масштабируемость типового решения.

Указанного недостатка частично лишены устройства с сосредоточенным накопителем энергии, подключаемым между полюсами преобразователя (рис. 5). Габариты преобразователя напряжения не зависят от энергоёмкости отдельно установленного накопителя энергии. Основным недостатком сосредоточенных накопителей является ограничение в используемых схемах соединения фаз, связанное с необходимостью наличия полюсов постоянного напряжения. Таким образом, для присоединения сосредоточенного накопителя наилучшим образом

подходит схема соединения фаз в две звезды с модулями, выполненными на полумостах либо на полных мостах.

Далее приведены оценочные расчёты параметров преобразователя и накопителя энергии для трёх вариантов схем, перспективных в плане создания поперечно подключаемого АФ с функциями компенсации реактивного тока нагрузки, её симметрирования, фильтрации токов высших гармоник и кратковременного электроснабжения нагрузки в паузе АПВ.

Вариант 1 – схема соединения фаз в треугольник, модули на полных мостах, распределённый накопитель, прямое подключение накопителя к низкоиндуктивному конденсатору.

Вариант 2 – схема соединения фаз в две звезды, модули на полумостах, прямое подключение накопителя энергии к полюсам преобразователя.

Вариант 3 – схема соединения фаз в две звезды, модули на полных мостах, прямое подключение накопителя энергии к полюсам преобразователя.

**Оценка параметров преобразователей и накопителей для рассматриваемых схем.** Техническим заданием на разработку АФ с функцией питания автономной нагрузки были определены следующие параметры:

мощность компенсатора  $S = 6$  Мвар;

номинальное напряжение сети  $V = 6$  кВ;

время питания автономной нагрузки  $\tau = 3$  с при выдаче активной мощности  $P = 3$  МВт;

напряжение на накопителе модуля в заряженном состоянии  $U_1 = 1200$  В;

наибольшее рабочее напряжение модуля суперконденсатора (единичного серийно выпускаемого суперконденсатора)  $U_s = 700$  В;

ёмкость модуля суперконденсатора  $C_s = 0,5$  Ф.

Коэффициент превышения наибольшего рабочего напряжения над номинальным  $K_1$  принят равным 1,2 (для сети до 10 кВ включительно). Коэффициент запаса по напряжению для компенсации падения напряжения на фазном реакторе  $K_2$  принят равным 10%.

**Вариант 1.** Минимальное число модулей ПН в фазе устройства равно отношению требуемого пикового напряжения  $V_p$ , формируемого каскадом модулей ПН, к напряжению  $V_{m1}$ , формируемому одним модулем. Напряжение  $V_p$  равно амплитуде линейного наибольшего рабочего напряжения сети, увеличенной на падение напряжения на реакторе, и определяется соотношением:

$$V_p = \sqrt{3} K_1 (1 + K_2) \cdot \sqrt{2} = 6 \cdot 1,2 \cdot (1 + 0,1) \cdot \sqrt{2} = 11,2 \text{ кВ.}$$

В полномостовом модуле с накопителем, включённым параллельно низкоиндуктивному конденсатору, можно пренебречь пульсациями напряжения на стороне постоянного тока модуля ПН. При этом напряжение  $V_{m1}$ , формируемое од-

ним модулем, равно напряжению на накопителе. Примем в расчёте, что напряжение  $U_2$  в конце разряда накопителя равно половине напряжения  $U_1$ , соответствующего началу перехода преобразователя в режим питания автономной нагрузки, т.е. составляет 600 В. Тогда для варианта 1 полное число модулей  $N_{v1}$  с учётом одного избыточного в каждой из трех фаз составит 60 шт. Необходимая ёмкость  $C_{s1}$  накопителя, встроенного в модуль ПН, определяется уравнением баланса энергии:

$$P\tau = N_{v1} \frac{C_{s1}(U_1^2 - U_2^2)}{2}.$$

Для заданных техническим заданием параметров АФ расчётная ёмкость  $C_{s1}$  составит 0,28 Ф. С учётом параметров суперконденсаторного модуля по напряжению и ёмкости получается, что на один модуль ПН необходимо не менее чем две параллельно соединённые ветви по два последовательно соединённых суперконденсаторных модуля, т.е. для первого варианта схемы АФ на всё устройство потребуется 240 суперконденсаторных модулей и 60 модулей ПН.

**Вариант 2.** Так же, как и в предыдущем варианте, минимальное количество модулей ПН в плече устройства равно отношению пикового напряжения  $V_p$ , формируемого каскадом модулей ПН, к напряжению  $V_{m1}$ , формируемому одним модулем. Однако в схеме варианта 2 используются полумостовые модули, формирующие только неотрицательное напряжение, и поэтому минимальное напряжение на каскаде модулей плеча должно быть вдвое больше амплитуды фазного напряжения сети [17]. Для варианта 2 напряжение  $V_p$  определяется соотношением:

$$V_p = \sqrt{3} K_1 (1 + K_2) \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 6 \cdot 1,2 \cdot (1 + 0,1) \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 12,9 \text{ кВ.}$$

Минимальное число модулей ПН в плече (половине фазы) устройства равно отношению пикового напряжения  $V_p$ , формируемого каскадом модулей плеча ПН, к напряжению  $V_{m1}$ , формируемому одним модулем. Однако, в отличие от схемы с распределённым накопителем, в варианте 2 нельзя пренебречь пульсациями напряжения на низкоиндуктивных конденсаторах модулей ПН, которые зависят от значения данной ёмкости, а также амплитуды и фазы тока плеча преобразователя. Как правило, предельный уровень пульсаций составляет 10% [18], тогда минимальное напряжение на модуле будет 1080 В. С учётом одного избыточного в каждом из шести плечей для варианта 2 число модулей  $N_{v2}$  составит 78 шт. без учёта ограничений, обусловленных накопителем.

В схеме две звезды на полумостах минимальное напряжение  $U_3$  между полюсами по значению равно произведению напряжения на одном модуле

ПН на число модулей в плече [19], что для рассматриваемых параметров преобразователя составляет 14,04 кВ. Для единообразия рассматриваемых вариантов будем считать, что накопитель выбран из расчёта выдачи 75% запасённой энергии, тогда напряжение  $U_4$  между полюсами преобразователя в момент времени, соответствующий началу перехода преобразователя в режим питания автономной нагрузки, будет вдвое больше напряжения  $U_3$  и равно 28,08 кВ, а количество модулей ПН с учётом требований к накопителю энергии будет вдвое больше и составит 156 модулей.

Необходимая ёмкость  $C_{s2}$  сосредоточенного накопителя, подключённого между полюсами, определяется соотношением:

$$P\tau = \frac{C_{s2}(U_4^2 - U_3^2)}{2}$$

Для заданных техническим заданием параметров АФ расчётная ёмкость  $C_{s2}$  составит 0,03 Ф. Учитывая параметры суперконденсаторного модуля по напряжению и ёмкости, получаем, что на один модуль ПН необходимо не менее чем три параллельные ветви, состоящие из 40 последовательно соединённых единичных суперконденсаторных модулей, т.е. для второго варианта схемы АФ на всё устройство потребуется 120 суперконденсаторных модулей и 156 модулей ПН.

**Вариант 3.** Рассмотрим ту же схему преобразователя, что и в варианте 2, но выполненную на полных мостах. Поскольку полномостовые модули позволяют формировать напряжение обеих полярностей, то минимальное количество модулей в плече равно отношению пикового напряжения  $V_p$ , формируемого каскадом модулей ПН, к напряжению  $V_{m1}$ , формируемому одним модулем. Напряжение  $V_p$  определяется соотношением:

$$V_p = VK_1(1+K_2) \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 6 \cdot 1,2 \cdot (1+0,1) \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 6,5 \text{ кВ.}$$

Так же, как и в варианте 2, при допущении о предельном уровне пульсаций на конденсаторе модуля ПН, равном 10%, минимальное напряжение на модуле составит 1080 В, тогда с учётом одного избыточного в каждом из шести плечей число модулей для варианта 3 составит 42 шт., что на 18 модулей меньше, чем для варианта 1, использующего те же модули ПН.

При сравнении вариантов 1 и 3 очевидно, что при одинаковом количестве модулей ПН лучшим вариантом будет вариант с меньшим количеством единичных суперконденсаторных модулей. При использовании такого же количества модулей в варианте 3, что и в варианте 1, число дополнительных модулей  $dN$  в каждом плече будет равно 4, а максимальное напряжение  $U_6$  между полюсами определяется соотношением:

$$U_6 = 2dNU_{\text{нм}} = 9,6 \text{ кВ,}$$

где  $U_{\text{нм}}$  – номинальное напряжение на модуле ПН.

Как и в предыдущих вариантах, будем считать, что напряжение  $U_6$  в начале разряда вдвое больше напряжения  $U_5$  в конце разряда накопителя. Необходимая ёмкость  $C_{s3}$  сосредоточенного накопителя, подключённого между полюсами, определяется соотношением:

$$P\tau = \frac{C_{s3}(U_6^2 - U_5^2)}{2}$$

Для заданных техническим заданием параметров АФ расчётная ёмкость  $C_{s3}$  составит 0,26 Ф. Учитывая параметры модуля суперконденсатора по напряжению и ёмкости, получим, что для подключения сосредоточенного накопителя к полюсам на начальное напряжение необходимо последовательно соединить 14 единичных суперконденсаторных модулей, а для получения необходимой ёмкости потребуется включение 7 таких ветвей параллельно, т.е. для третьего варианта схемы АФ на всё устройство потребуется 98 суперконденсаторных модулей и 60 модулей ПН.

## Выводы

Рассмотрены три варианта схем модульных многоуровневых преобразователей напряжения, оснащённых суперконденсаторным накопителем энергии. Вариант 1 – схема соединения фаз в треугольник, модули на полных мостах, распределённый накопитель, прямое подключение накопителя к низкоиндуктивному конденсатору; вариант 2 – схема соединения фаз в две звезды, модули на полумостах, прямое подключение накопителя энергии к полюсам преобразователя; вариант 3 – схема соединения фаз в две звезды, модули на полных мостах, прямое подключение накопителя энергии к полюсам преобразователя.

Для создания поперечно подключаемого АФ с функциями компенсации реактивного тока нагрузки, её симметрирования, фильтрации токов высших гармоник и кратковременного электроснабжения нагрузки в паузе АПВ при заданных техническим заданием на АФ параметрах по мощности и энергоёмкости оптимальной (по критерию минимума комплектующих) является схема соединения фаз в две звезды с модулями на полных мостах и прямым подключением накопителя энергии к полюсам преобразователя.

## Список литературы

1. Жежеленко, И. В. Оценка надёжности электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, А. В. Горинич // Вести в электроэнергетике. – 2006. – № 6. – С. 13 – 17.

2. *PAN* European LPQI power quality survey [Text] // Proceedings of 19<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2007). – Vienna, 2007.
3. *Eberhard, A.* Power Quality [Text] / A. Eberhard. – InTECH, 2011. – 374 p.
4. *Rashid, M. H.* Power electronics handbook [Text] / M. H. Rashid. – Elsevier, 2011. – 1409 p.
5. *Rodrigo, F. M.* Modular multilevel converters: control and applications [Electronic resource] / F. M. Rodrigo, D. Ramirez, A. B. Rey-Boue [et al.]. – Energies 2017, doi: 10.3390/en10111709.
6. *Абдулвелеев, И. Р.* Анализ способов модуляции напряжения активных выпрямителей на базе модульных многоуровневых конвертеров [Текст] / И. Р. Абдулвелеев, Т. Р. Храмшин, Г. П. Корнилов // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2015. – № 3. – С. 25 – 36.
7. *Матинян, А. М.* Компенсация реактивного тока прямой последовательности и тока обратной последовательности с помощью СТК и АФКУ [Текст] / А. М. Матинян // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2016. – № 1. – С. 12 – 16.
8. *Hagiwara, M.* Negative-Sequence Reactive-Power Control by a PWM STATCOM Based on a Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC-SDBC) [Text] / M. Hagiwara, R. Maeda, H. Akagi // IEEE transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 48 (2). – P. 720 – 729.
9. *Behrouzian, E.* Investigation of negative sequence injection capability in H-bridge Multilevel STATCOM [Text]: Proceedings of Power Electronics and Applications 2014 – 16th European Conference / E. Behrouzian, M. Bongiorno, H. Z. De La Parra. – Lappeenranta, 2014.
10. *Musolino, V.* A comparison of supercapacitor and high-power Lithium batteries [Text]: Electrical systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion / V. Musolino, E. Tironi. – Bologna, 2010.
11. *Burke, A.* Applications of supercapacitors in electric and hybrid vehicles [Text]: 5th European symposium on supercapacitor and hybrid solutions / A. Burke, H. Zhao. – Brasov, 2015.
12. *Сон, Э. Е.* Гибридная система накопления энергии [Текст] / Э. Е. Сон, К. К. Деньчиков, А. З. Жук, А. Н. Новиков, Н. Л. Новиков // Энергоэксперт. – 2017. – № 4. – С. 47 – 53.
13. *Yang, X.* Super Capacitor Energy Storage Based MMC for Energy Harvesting in Mine Hoist Application [Text] / X. Yang, P. Wen, Y. Xue [et al.] // Energies. – 2017. – Vol. 10 (9). – P. 1 – 11.
14. *Cherix, N.* Thesis: Functional Description and Control Design of Modular Multilevel Converters – Towards Energy Storage Applications for Traction Networks [Text] / N. Cherix. – Ecole Polytechnique, 2015. – 206 p.
15. *Zygmanski, M.* Power Conditioning System with Cascaded H-Bridge Multilevel Converter – DC-link Voltage Balancing Method [Text]: Proceedings of Power Electronics and Applications 2011 – 14<sup>th</sup> European Conference / M. Zygmanski, B. Grzesik, J. Michalak. – Birminham, 2011.
16. *Hillers, A.* Optimal design of the modular multilevel converter for an energy storage system based on split batteries [Text]: Proceedings of Power Electronics and Applications 2013 – 15<sup>th</sup> European Conference / A. Hillers, J. Biela. – Lille, 2013.
17. *Visiladiotis, M.* Modular Converter Architecture for Medium Voltage Ultra Fast EV Charging Stations: Global System Considerations [Text]: Proceedings of Electric Vehicle Conference / M. Visiladiotis, A. Rufer, A. Beguin. – Greenville, 2012.
18. *Merlin, M. M. C.* Cell capacitor sizing in modular multilevel converters and hybrid topologies [Text]: 14<sup>th</sup> European conference on Power electronics and applications / M. M. C. Merlin, T. C. Green, P. D. Mitcheson [et al.] – Lappeenranta, 2014.
19. *Дроздов, А. В.* Применение модульных многоуровневых преобразователей для улучшения качества электроэнергии в точке присоединения резкопеременной нагрузки [Текст] / А. В. Дроздов, А. Н. Киселев, А. М. Матинян // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2014. – № 1. – С. 19 – 23.