

ния или отключения коммутирующей аппаратуры. Путем соответствующего соединения конденсаторов возможен выбор оптимальной программы для данного участка цепи.

Для всех систем регулирования мощности конденсаторных установок независимо от того, по каким параметрам это регулирование производится: необходимо, чтобы включение конденсаторной установки после ее отключения происходило с обязательной выдержкой времени не менее 3-5 мин для разрядки конденсаторов

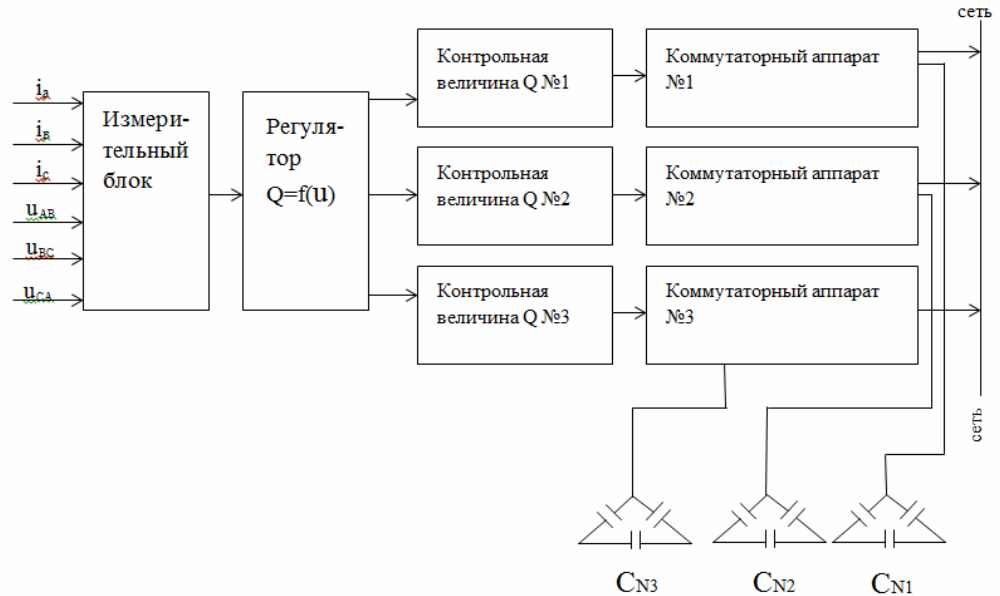


Рис. 3. Система регулирования реактивной мощности в сетях до 1000 В

**Список литературы:**

[1] Электроснабжение промышленных предприятий. Киев «Высшая школа» 1998 г. 280 с.  
 [2] Компенсация реактивной мощности. Б.А.Константинов, Г.З.Зайцев. «Энергия» Ленинград 1985 г 101 с  
 [3] Курс электротехники. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Высшая школа. Москва. 2005 г 531 г.

*Г.И. Коробко, С.В.Попов, А.С. Макаев*  
 ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ  
 В СИСТЕМЕ КОМПЕНСАЦИИ НЕСИММЕТРИИ  
 И ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СУДОВОЙ СЕТИ**

Стабилизация напряжения судовой сети и компенсация ее асимметрии является в настоящее время актуальной задачей.

На рисунке 1 изображена типовая схема СЭС с двумя генераторами и подключенной к шинам ГРЩ нагрузкой различных видов (трехфазная, однофазная, линейная, нелинейная, асинхронная и т.д.). Специфической особенностью судовой электростанции (СЭС) является соизмеримость мощности источников электроэнергии и отдель-

ных потребителей, поэтому важнейшей характеристикой эффективности работы СЭЭС является качество электроэнергии в различных режимах ее работы.

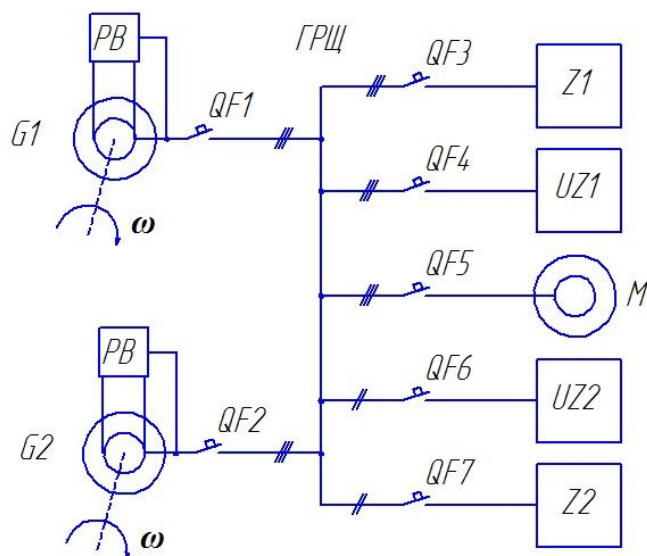
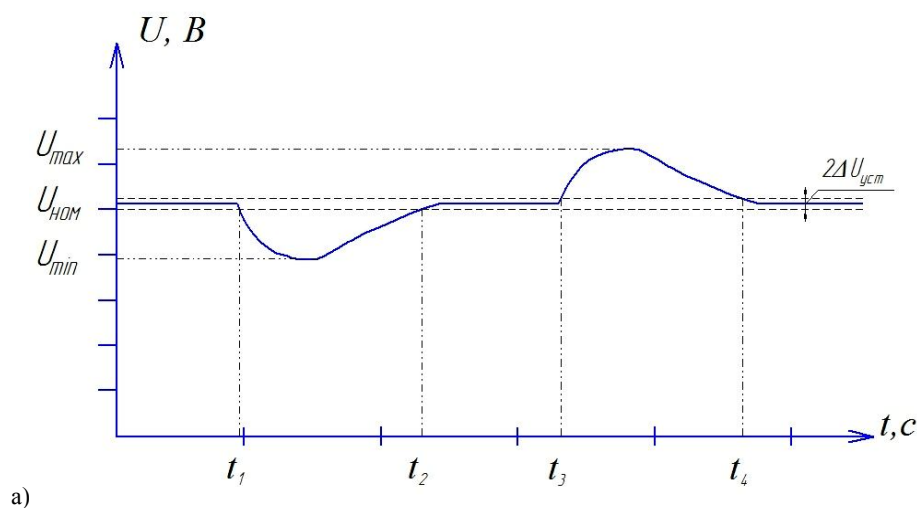
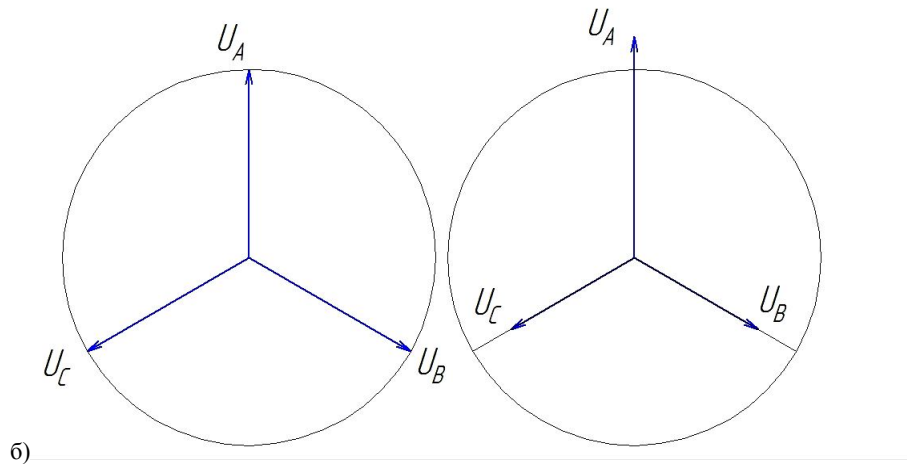


Рис. 1. Судовая электроэнергетическая система

Изменение нагрузки СЭС (включение и отключение потребителей) или изменение мощности, потребляемой отдельными мощными приемниками, приводит к изменению напряжения и частоты, т.е. к переходному процессу. Поэтому показатели качества электроэнергии в динамических режимах работы СЭЭС меняются относительно значений, принятых за номинальные и допустимые.

На рисунке 2а показан переходный процесс при набросе с сбросе симметричной нагрузки (включение мощного асинхронного двигателя), на котором видны провалы и всплески напряжения, которые объясняются инерционностью системы регулирования возбуждения генераторов. На рисунке 2б показано изменение векторной диаграммы напряжений сети при подключении однофазной нагрузки, вызывающей несимметрию.





б)

Рис. 2. а) Переходный процесс при набросе и сбросе нагрузки.  
 б) Векторная диаграмма напряжений сети при включении однофазной нагрузки.

Небаланс напряжений трехфазной системы отрицательно сказывается как на работе силового электрооборудования, так и на других приемниках. У синхронных генераторов возникает дополнительный нагрев ротора и статора, увеличивается вибрация генератора. У асинхронных двигателей возникают значительные дополнительные потери и происходит дополнительный нагрев, кроме того снижается частота вращения вследствие увеличения вибрации. Однофазные приемники воспринимают небаланс как повышение или понижение напряжения. В трехфазных выпрямителях небаланс напряжений проявляется как низкочастотная пульсация выходного напряжения [1].

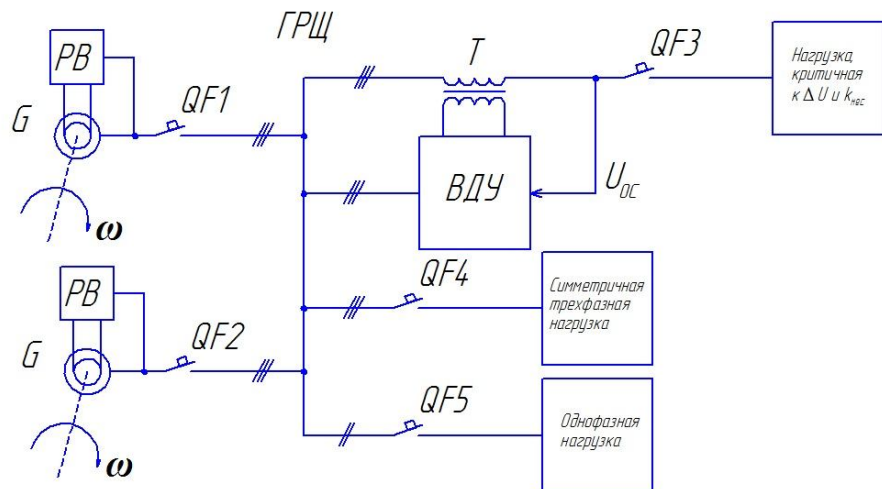


Рис. 3. Функциональная схема вольтодобавки

Устранение указанных негативных воздействий может быть обеспечено за счет использования вольтодобавочных устройств. Очевидно, что не все потребители критичны к отклонению питающего напряжения и его асимметрии, поэтому всегда можно выделить группу потребителей, которые требуют качественного в этом отношении питания. На схеме (рисунок 3) эти потребители получают питание через вольтодоба-

вочные трансформаторы – ВДТ, вторичная обмотка которых подключена к вольтодобавочному устройству на базе широтно-импульсных преобразователей.

Обычная вольтодобавка питается непосредственно от сети, ввиду чего возникает необходимость завышения мощности устанавливаемых вольтодобавочных устройств при формировании вольтодобавки в момент провала напряжения. Кроме того работа вольтодобавки приведет к дополнительному снижению напряжения на остальных потребителях [2].

Устранять указанный недостаток можно, питая вольтодобавочные устройства от сети постоянного тока с использованием накопителем энергии (аккумуляторная батарея или конденсатор большой ёмкости). Блок-схема такого устройства представлена на рисунке 4. Очевидно, что ёмкость накопителя будет определяться величиной максимально возможного провала напряжения и мощностью (током), потребляемой нагрузкой, критичной к качеству напряжения [3].

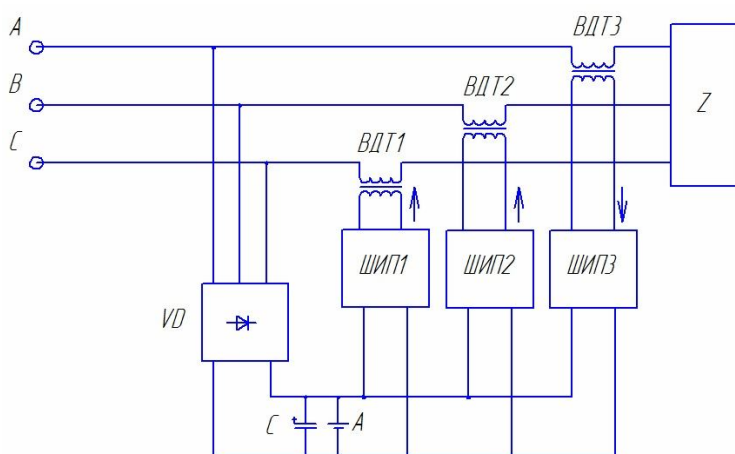


Рис. 4. Схема вольтодобавочного устройства с накопителем энергии

В момент провала напряжения для поддержки напряжения используется мощность, запасенная в накопителе, в момент его всплеска энергия возвращается в накопитель. В режиме асимметрии, например, в двух фазах осуществляется вольтодобавка, а в третьей вольтоотбавка. При этом обеспечивается обмен электроэнергией между фазами через накопитель.

Различные типы накопителей отличаются не только объёмом запасаемой энергии, но и скоростью её накопления и отдачи («зарядки» и «разрядки»), удельной плотностью накопленной энергии, возможными сроками её хранения и многими другими параметрами, включая надёжность и стоимость изготовления и обслуживания [4,5].

Самые массовые «электрические» накопители энергии – это конденсаторы. Они обладают огромной скоростью накопления и отдачи энергии – как правило, от нескольких тысяч до многих миллиардов полных циклов в секунду, и способны работать в таком режиме в широком диапазоне температур многие годы, а то и десятилетия. Объединяя несколько конденсаторов параллельно, легко можно увеличить их суммарную ёмкость до нужной величины.

Однако у конденсаторов есть два основных недостатка – весьма малая удельная плотность запасаемой энергии и потому небольшая (относительно других видов накопителей) ёмкость и малое время хранения, которое редко превышает несколько часов, а для некоторых моделей составляет лишь доли секунды. В результате область применения конденсаторов ограничивается различными электронными схемами и кратковременным накоплением.

Электрохимические аккумуляторы используют при необходимости запастись достаточно большой энергией – от нескольких сотен кДж и более. Однако они имеют немалые габариты и, главное, вес. Если же требуется относительно небольшая ёмкость, то используются более современные типы аккумуляторов – никель-кадмиевые, металл-гидридные, литий-ионные, полимер-ионные и др. Они имеют гораздо более высокую удельную ёмкость, однако и удельная стоимость хранения энергии у них заметно выше, поэтому их применение обычно ограничивается относительно небольшими и экономичными устройствами. По режиму использования электрохимические аккумуляторы ориентированы на относительно равномерный разряд в течение достаточно длительного времени, когда параметры разряда сравнимы с током и временем зарядки, а глубина разряда может быть достаточно большой. К недостаткам электрохимических аккумуляторов можно отнести ограниченное число циклов заряда-разряда (в большинстве случаев – 1..2 тысячи, чувствительность к температуре, длительное время заряда, иногда в десятки раз превышающее время разряда, и необходимость соблюдения методики использования (недопущение глубокого разряда для свинцовых аккумуляторов и, наоборот, необходимость соблюдения полного цикла заряда-разряда для металл-гидридных и некоторых других типов аккумуляторов).

Ионисторы можно рассматривать как своего рода промежуточное звено между электролитическими конденсаторами и электрохимическими аккумуляторами. От первых они унаследовали большое число циклов заряда-разряда, а от вторых – относительно невысокие токи зарядки и разрядки (цикл полной зарядки-разрядки может длиться секунду, а то и намного дольше). Ёмкость их также находится в диапазоне между наиболее ёмкими конденсаторами и небольшими аккумуляторами – обычно запас энергии составляет от единиц до нескольких сотен джоулей. Дополнительно следует отметить достаточно высокую чувствительность ионисторов к температуре и ограниченное время хранения заряда – от нескольких суток до нескольких недель максимум.

Суперконденсатор представляет собой импульсное электрохимическое устройство, предназначенное для компенсации быстрых переходных процессов в различных электрических схемах. От аккумуляторов различных типов он отличается существенно меньшей энергоёмкостью (единицы Вт·ч/кг) и повышенной удельной мощностью (2–10 кВт/кг). Так как химических превращений веществ в процессе работы суперконденсатора не происходит (если не допускать превышения зарядных напряжений), ресурс системы достаточно велик и может превышать 100 000 циклов заряда-разряда.

Асимметричные электрохимические конденсаторы (НЭО) – новый класс накопителей энергии, который занимает функциональную нишу между традиционными конденсаторами и аккумуляторными батареями. Как продукт «зеленых» технологий, электрохимические конденсаторы способны быстро накапливать и отдавать энергию, в объемах на порядок превышающих аналогичные показатели для обычных конденсаторов. С другой стороны в отличие от аккумуляторов, электрохимические конденсаторы обладают высокой удельной мощностью, ресурсом не менее миллиона циклов заряда-разряда, не требуют технического обслуживания и надежно работают в условиях экстремальных температур.

Различные типы электрохимических накопителей энергии используют различные виды химических источников тока, поэтому для их сравнения необходимо выбрать общие для всех типов электрохимических накопителей параметры. К этим параметрам можно отнести: стоимость удельных энергии и мощности; удельная энергоёмкость; срок службы; число циклов заряд-разряд.

Для различных типов накопителей предложенные показатели сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Тип накопителя						
	СКА	NiCd	NaS	Li-ion	Иони-стор	Супер-конденсатор	НЭО
Стоимость, \$/кВт	200-1100	650-2300	230-950	650-2900	100-300	100-250	250-300
Стоимость, \$/кВт*ч	350-850	650-1400	1000-2700	1300-3800	250-650	250-650	300-900
Плотность, Вт*ч/кг	30-60	45-80	100-160	120-200	200-600	3-10	180
Срок службы, циклы	160-1200	1200-2800	1700-3000	2900-5500	>10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>	>10 <sup>6</sup>
Напряжение ячейки, В	1,25	1,25	1,25	3,6	2,5-6,3		<600

Для сравнения емкостного и аккумуляторного накопителей были определены их емкость и рабочее напряжение. Расчет производился для нагрузки мощностью 100кВт при  $\cos\varphi=0,8$  и напряжении 380В. Величина провала напряжения задавалась на уровне 15% от номинального значения, при его длительности  $t_{np}=1,5с$ .

Для обеспечения вольтодобавки способной полностью скомпенсировать заданный провал постоянное напряжение и ток на входе широтно-импульсного преобразователя должны составлять:  $U_d=520В$ ,  $I_d=50А$ , соответственно.

Учитывая, что в процессе отдачи энергии напряжение на емкостном накопителе будет снижаться, задавая величину максимального снижения напряжения на конденсаторе  $\Delta U_C=10В$  определяем его емкость:

$$C = \frac{I_d \cdot t_{np}}{\Delta U_C} = 5\Phi \quad (1)$$

Рабочее напряжение конденсатора должно составлять 630В с учетом возможного повышения в динамических режимах работы.

Емкость аккумуляторного накопителя определяется из выражения:

$$C_{AB} = \frac{I_d \cdot t_{np} \cdot k_3}{3600} = 0,05А \cdot ч, \quad (2)$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса, учитывающий снижение напряжения на аккумуляторе при его разряде. Аккумуляторный накопитель должен иметь рабочее напряжение 520 В.

Однако аккумулятор такой емкости не сможет отдать в сеть необходимый разрядный ток в 50 А. В связи с чем его емкость должна быть увеличена в 50 раз до 2,5 А·ч.

Для получения указанного напряжения в составе аккумуляторной батареи придется использовать 41 стандартный кислотный аккумулятор, или 20 литиевых аккумуляторных элементов, цена которых на порядок выше. Также следует учитывать, что аккумуляторные батареи требуют более внимательного и частого технического обслуживания.

Учитывая специфику работы инвертора в составе устройства компенсации несимметрии и отклонения напряжения судовой сети, а также особенности работы накопителей, целесообразно на наш взгляд использовать гибридные схемы, например, суперконденсатор и аккумулятор. В этом случае суперконденсатор будет запасать или

отдавать энергию в пиковых режимах генерации или потребления электроэнергии, увеличивая ресурс аккумулятора и снижая время отклика всей системы на внешние воздействия.

#### Список литературы:

- [1] Качество электрической энергии на судах/ В.В. Шейнихович [и др.]: Справочник/Л.: Судостроение, 1988. – 160 с.
- [2] Коробко Г.И. Анализ построения силовых схем стабилизаторов переменного напряжения (СПН) с широтно-импульсными преобразователями. / Коробко Г.И., Попов С.В. // Электрооборудование промышленных установок: межвуз. сб. научн. тр. / НГТУ. – Н.Новгород, 2001. с. 25–28.
- [3] Коробко Г.И. Накопители электроэнергии в стабилизаторах переменного напряжения для специальных судовых потребителей./ Г.И. Коробко, С.В. Попов: Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 13. Судовая и промышленная энергетика. Н.Новгород: ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2005 г. – с. 54–57.
- [4] Попель О.С., Тарасенко А.Б. Накопители электрической энергии // Энергоэксперт. 2011. №3. С. 28–37.
- [5] Хрусталева Д.А. Аккумуляторы. // М.: ООО «Изумруд». 2003.

**В.В. Лебедев**  
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

## АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ ВЫДЕЛЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ АУТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Проблема поддержания надлежащего качества электроэнергии становится все более актуальной. Решением одной из задач повышения качества электроэнергии является компенсация нелинейных искажений напряжения сети. Существуют различные способы компенсации нелинейных искажений, однако, наиболее перспективным является применение активных компенсаторов нелинейных искажений. Принцип работы таких устройств основан на генерации в сеть высших гармоник напряжения или тока соответствующей амплитуды, находящихся в противофазе с высшими гармониками сети. Существуют различные варианты построения таких устройств. Один из них – это компенсатор нелинейных искажений на базе вольтодобавочных устройств.

Основной задачей, решаемой при построении компенсатора, является точное выделение сигнала суммы высших гармонических составляющих напряжения сети. Однако, создание такого устройства для автономной электростанции, в частности судовой, осложняется изменением частоты и амплитуды напряжения сети. Поскольку регуляторы частоты вращения дизелей и возбуждения генераторов обладают ограниченным быстродействием, система управления компенсатором должна обеспечивать качественное выделение высших гармоник и в динамических режимах работы электростанции.

Анализ устройств выделения сигнала высших гармоник показал:

1. Генератор эталонного синусоидального напряжения [1], реализованный на базе микроконтроллера представлен на рис. 1. Микроконтроллер формирует эталонную синусоиду, синхронизированную с сетью, однако, в данном устройстве не учитывается изменение амплитуды сетевого напряжения. Вследствие этого в сигнале суммы высших гармоник, получаемом за счет вычитания из напряжения сети эталонного напряжения, появится основная гармоника, что негативно скажется на качестве ком-