

АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ СЕТИ

ANALYSIS OF IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY AT ACTIVE FILTERING OF HARMONIC DISTORTION OF NETWORK

Актуальность статьи связана с непрерывным ростом требований к повышению качества электрической энергии, которые обуславливают применение более совершенных методов по её поддержанию на необходимом для систем энергоснабжения уровне. В статье рассматриваются системы активной фильтрации гармонических искажений, актуальной в наибольшей степени для автономных электроэнергетических систем, включая большинство систем водного транспорта. Приведена структура и принципы подходов к активной фильтрации гармонических искажений в сети. Проанализирован и описан положительный опыт использования активных фильтров, выявлены существенные недостатки по использованию различных компонентов индивидуальной и централизованной активной фильтрации с целью дальнейших исследований и проведения экспериментальных опытов по созданию более совершенного активно-резонансного устройства компенсации гармоник токов и напряжений.

The relevance of article associated with the continuous increasing demands to improvement of quality of electric energy, that determine the application of improved methods for keeping it at a desired level for power supply systems. In article considers the system of active filtering of harmonic distortion in the network, the most topical for independent electric power systems, including the majority of water transport systems. Is described the positive experience of using active filters and identifies possible violations and deficiencies on the use of the various components of the individual and centralized active filter in order to further research and the pilot experiments to create a more perfect active-resonance harmonics compensation device of currents and voltages.

Ключевые слова: гармонические искажения, активный фильтр, амплитудно-импульсная модуляция, резонанс токов и напряжений.

Key words: harmonic distortions, active filter, pulse-amplitude modulation, resonance of currents and voltages.



ЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ системы являются основной структурой техногенного комплекса различных субъектов использования и потребления электрической энергии. При этом сложность самой системы и происходящих в ней процессов приводит к тому, что возникают риски аварийных ситуаций. Таким образом, необходимо разрабатывать различные мероприятия, направленные на передачу по электроэнергетическим системам качественной электрической энергии. Известно, что качественная электрическая энергия должна обладать стабильным напряжением синусоидальной формы и частотой, изменяющейся в оптимальных пределах. Нормы этих показателей определены в Межгосударственном стандарте ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» для береговых электрических сетей и в Правилах классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства для судовых электроэнергетических систем [1], [2].

Нарушение условий, связанных с процессом выработки, преобразования, потребления и распределения электроэнергии, чаще всего возникают из-за большого количества потребителей, имеющих нелинейные вольт-амперные характеристики, которые, в свою очередь, создают искажения синусоидальной формы кривой тока и напряжения, так называемые *гармоники*. Источниками гармоник служат синхронные генераторы электростанций, силовые трансформаторы, работающие при повышенном напряжении на их выводах, различного рода преобразовательные устройства переменного тока в постоянный и другие энергопотребители.

В настоящее время установлено существование различных спектров гармоник, в различной степени оказывающих влияние на электроэнергетические системы. При этом наибольший убыток электроэнергетическим и коммутационным системам, а также электрооборудованию наносят именно высшие гармоники. Например, при возникновении гармоник в сети в синхронных машинах могут возникать дополнительные потери активной мощности, нагрев статора и ротора, опасные вибрации из-за несимметрии токов в обмотках электрических машин [3]. Кроме того, существует повышенная опасность возникновения резонансных явлений в электроэнергетических сетях.

Возникающие вследствие гармонических искажений токи нулевой последовательности, протекающие через нулевой проводник меньшего сечения по отношению к фазным проводникам, вызывают его сильный нагрев. Зафиксирован ряд случаев возникновения возгораний при перегреве нулевых проводников, сечение которых составляло 25 или 50 % фазного провода [4]. Убыток от высших гармонических возмущений ставит перед поставщиками электрической энергии задачу по снижению уровней высших гармоник в электрических сетях для передачи качественной электрической энергии потребителю [5].

Борьба с высшими гармониками является наиболее эффективной, когда при проектировании энергосистемы известно примерное количество линейных и нелинейных нагрузок. При этом на практике нагрузка имеет переменный характер, т. е. наблюдается рост числа нелинейных потребителей, ухудшающих качество энергоснабжения как в городских энергосетях с появлением электронных бытовых устройств, так и на промышленных предприятиях и судовых электроэнергетических системах при их развитии, модернизации и автоматизации. Решением данной проблемы является создание различных устройств для подавления искажений электрического сигнала с высоким КПД и минимальными массогабаритными показателями. Уменьшение гармонических составляющих возможно с помощью применения пассивных и активных фильтров. Последние считаются наиболее эффективным решением, но имеют свои недостатки.

Современные активные фильтры могут осуществлять фильтрацию гармоник для индивидуальных нагрузок, например, нагрузок с частотно-регулируемым приводом, групповую фильтрацию, при которой можно компенсировать выбранную группу нагрузок и центральную фильтрацию гармоник при подсоединении фильтра в общей точке нескольких присоединений, не затрагивая текущую конфигурацию системы. Индивидуальная фильтрация гармоник тока нелинейных нагрузок может осуществляться с помощью использования схемы, приведенной на рис. 1 [6].

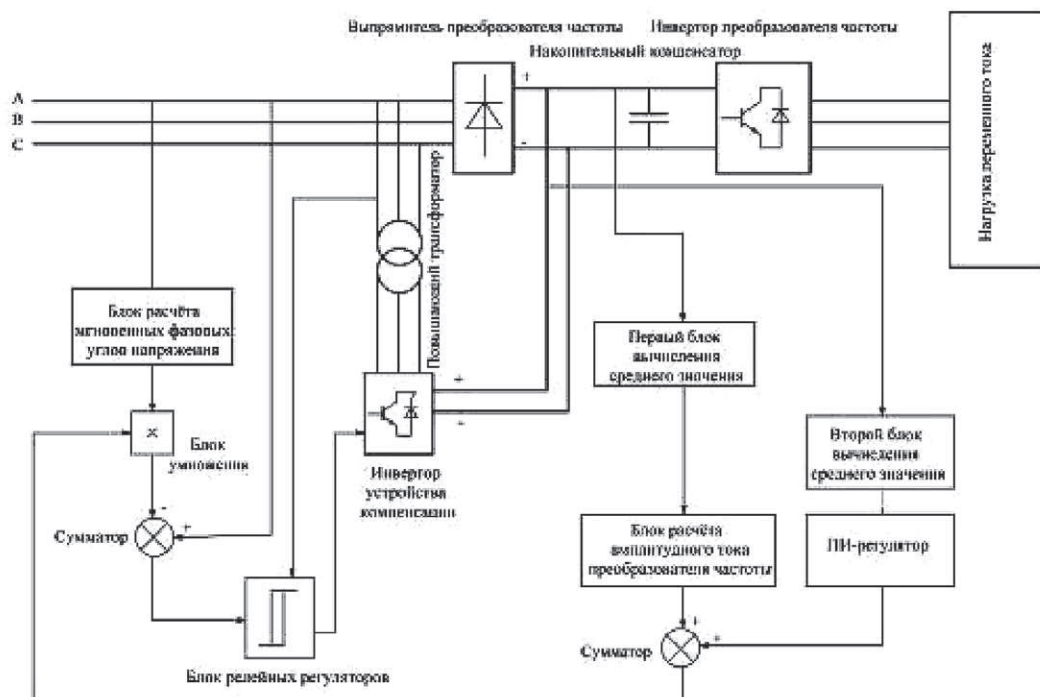


Рис. 1. Индивидуальный фильтр высших гармоник нелинейной нагрузки

Нелинейная нагрузка на схеме представлена входным диодным выпрямителем преобразователя частоты. Для уменьшения влияния мощности искажения и повышения коэффициента мощности, потребляемой нелинейной нагрузкой, блок расчёта мгновенных фазовых углов напряжения снимает напряжения с фаз сети u_{1A} , u_{1B} , u_{1C} с помощью датчиков напряжения и рассчитывает синусы мгновенных фазовых углов напряжения сети [6]:

$$\begin{cases} \sin(2\pi f_1 t) = \frac{\sqrt{3}u_{1A}}{2\sqrt{u_{1A}^2 + u_{1B}^2 + u_{1A} \cdot u_{1B}}}; \\ \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}u_{1B}}{2\sqrt{u_{1A}^2 + u_{1B}^2 + u_{1A} \cdot u_{1B}}}; \\ \sin\left(2\pi f_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}u_{1C}}{2\sqrt{u_{1A}^2 + u_{1B}^2 + u_{1A} \cdot u_{1B}}}, \end{cases} \quad (1)$$

где f_1 — частота напряжения сети; t — текущее время.

В блоке умножения синусы мгновенных фазовых углов напряжения умножаются на заданную амплитуду тока сети I_{1m}^* , формируя мгновенные значения фазовых токов I_{1A}^* , I_{1B}^* , I_{1C}^* :

$$\begin{cases} I_{1A}^* = I_{1m}^* \sin(2\pi f_1 t); \\ I_{1B}^* = I_{1m}^* \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{2\pi}{3}\right); \\ I_{1C}^* = I_{1m}^* \sin\left(2\pi f_1 t - \frac{2\pi}{3}\right). \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, заданный ток совпадает по фазе с напряжением, что позволяет поддерживать значение коэффициента мощности, близкое к единице. Для уменьшения пульсаций, возникающих из-за постоянного обмена мощностями между инвертором и конденсатором, значения постоянного тока с преобразователя частоты I_d и постоянного тока с устройства компенсации I_{df} усредняют в первом и втором блоках вычисления среднего значения в течение определённого промежутка времени T_k :

$$\begin{cases} I_{dA} = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} I_d dt; \\ I_{dfA} = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} I_{df} dt. \end{cases} \quad (3)$$

Для стабилизации коэффициента амплитуды переменного тока вычисляют её значение в блоке расчёта амплитудного значения переменного тока, корректируемого с помощью ПИ-регулятора:

$$I_{1mp}^* = \sqrt{2k_{cx} I_{dc}}, \quad (4)$$

где $k_{cx} = 0,816$ — известный коэффициент выпрямления по току трёхфазной мостовой схемы.

Трёхфазный переменный ток с устройства компенсации I_f^* имеет вид:

$$I_f^* = I_{n1} - I_1^*, \quad (5)$$

где I_1^* — задание на трёхфазный ток сети с выхода блока умножения; I_{n1}^* — трёхфазный переменный ток с преобразователя частоты.

Поддержание заданного тока с устройства компенсации I_f^* осуществляется с помощью блока релейных регуляторов, который определяет разницу между заданным и фактическим значениями мгновенных фазных токов с устройства компенсации ΔI_{fA} , ΔI_{fB} , ΔI_{fC} следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta I_{fA} = I_{fA}^* - I_{fA}; \\ \Delta I_{fB} = I_{fB}^* - I_{fB}; \\ \Delta I_{fC} = I_{fC}^* - I_{fC}, \end{cases} \quad (6)$$

где $I_{fA}^*, I_{fB}^*, I_{fC}^*$ — значения мгновенных фазных токов с устройства компенсации; I_{fA}, I_{fB}, I_{fC} — фактические значения мгновенных фазных токов с устройства компенсации.

Значения сигналов Q_A, Q_B, Q_C с выходов релейных регуляторов, воздействующие на работу тиристорных ключей инвертора устройства компенсации, определяются по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} Q_A = 1 \text{ при } \Delta I_{fA} \geq \frac{h}{2}; Q_A = -1 \text{ при } \Delta I_{fA} \leq -\frac{h}{2}; \\ Q_B = 1 \text{ при } \Delta I_{fB} \geq \frac{h}{2}; Q_B = -1 \text{ при } \Delta I_{fB} \leq -\frac{h}{2}; \\ Q_C = 1 \text{ при } \Delta I_{fC} \geq \frac{h}{2}; Q_C = -1 \text{ при } \Delta I_{fC} \leq -\frac{h}{2}, \end{cases} \quad (7)$$

где h — зона гистерезиса, являющаяся регулируемым параметром регулятора и обеспечивающая задержку включения во избежание одновременной работы тиристорных ключей и инвертора устройства компенсации [7].

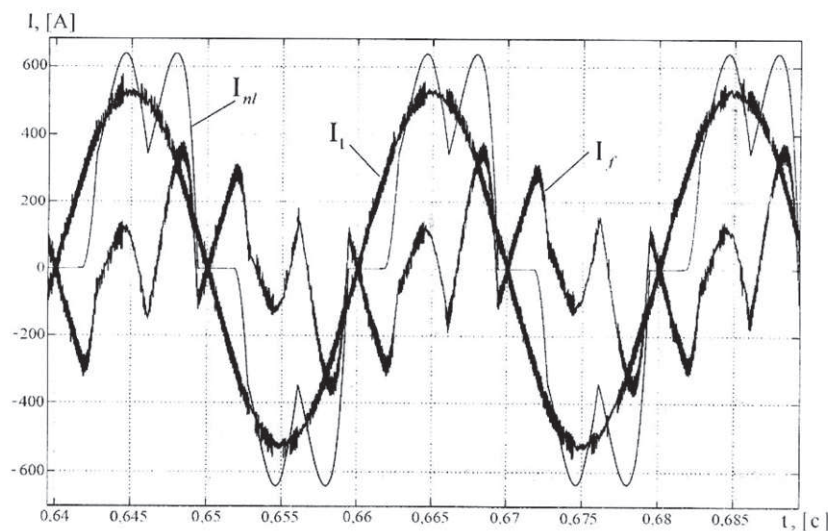


Рис. 2. Диаграмма токов при индивидуальной фильтрации высших гармоник от нелинейной нагрузки

На рис. 2 приведена диаграмма токов при применении описанного индивидуального фильтра высших гармоник, которая показывает уменьшение гармонических искажений трёхфазного тока сети одной фазы I_f преобразователя частоты. К недостаткам такой системы фильтров можно отнести, во-первых, то, что использование релейных регуляторов практически невозможно в системе регулирования, если величина переходного процесса будет больше, чем задержка в изменении выходного сигнала после начала изменения входного сигнала (транспортное запаздывание) [7]. Данное обстоятельство отражается на качестве регулирования пульсаций токов с устройства компенсации. В такой схеме целесообразно использовать регуляторы на основе ПИД-регулирования. Во-вторых, применение индивидуальных активных фильтров не всегда возможно, так как их необходимо применять для большинства нелинейных нагрузок в отдельности, что может привести к значительным затратам и увеличению массогабаритных показателей оборудования. Таким образом, борьба с гармоническими искажениями более эффективна при централизованной или групповой фильтрации гармоник. Примером централизованной фильтрации искажений в энергосистеме

может являться метод уменьшения гармоник при компенсации отклонений напряжения сети, схема которого приведена на рис. 3.

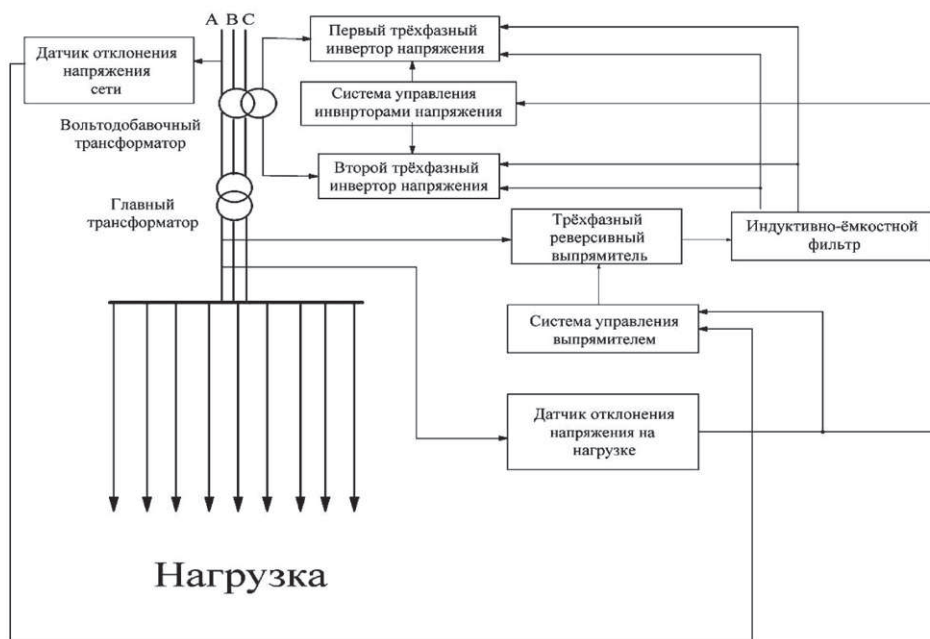


Рис. 3. Схема амплитудно-импульсного метода уменьшения гармоник

При возникновении отклонения напряжения в сети от номинальных режимов в схеме создается добавочное напряжение, обратное по знаку и равное по величине сумме высших гармоник напряжения сети, при помощи вольтодобавочного трансформатора, который автоматически компенсирует отклонение напряжения на входе у главного трансформатора и стабилизирует напряжение на нагрузке. Основным параметром, определяющим массогабаритные показатели, является мощность вольтодобавочного трансформатора как средства целенаправленного воздействия на несинусоидальные искажения сети. Как показывает опыт, предпочтительными являются схемы включения такого фильтра перед группой нелинейных потребителей или перед одним мощным потребителем либо централизованно. Из-за подключения в сеть вольтодобавочного трансформатора последовательно, его мощность определяется добавочным напряжением, которое состоит из суммы высших гармоник напряжения сети, номинальным током нелинейной нагрузки или суммарным номинальным током группы потребителей. Подобный метод активной компенсации гармоник является наиболее перспективным, поскольку может быть реализован в автономных и судовых электроэнергетических системах, особенностью которых является использование трёхпроводной или четырёхпроводной системы электроснабжения с изолированной нейтралью [8].

Управление вольтодобавочным устройством осуществляется с помощью сигнала разности напряжения сети, который содержит весь спектр гармоник, и первой гармоники напряжения:

$$\Delta U = U_{\text{сети}} - U_1, \quad (8)$$

где $U_{\text{сети}} = U_1 + \sum_{i=2}^n U_i$ — напряжение сети; U_1 — первая гармоника напряжения, равная 50 Гц.

Таким образом, сигнал разности будет представлен в виде суммы гармоник напряжения, которые находятся в противофазе с высшими гармониками напряжения сети:

$$\Delta U = \sum_{i=2}^n U_i, \quad (9)$$

где i — номер гармоники.

Для высших гармоник напряжение вольтодобавки будет определяться следующим образом [8]:

$$U_{\text{вд}} = U_i \cdot k_{\text{вд}}, \quad (10)$$

где $k_{\text{вд}}$ — коэффициент усиления вольтодобавочного устройства.

Из выражения (10) видно, что каждая гармоника напряжения сети будет уменьшаться пропорционально увеличению $k_{\text{вд}}$.

Регулирование добавочного напряжения производится с помощью импульсных напряжений двумя трёхфазными инверторами напряжения, имеющими общую систему управления, и амплитудного регулирования трёхфазным реверсивным выпрямителем со своей системой управления.

С целью улучшения качества выходного напряжения в схеме заданы области амплитудно-импульсного регулирования напряжения. В области больших отклонений напряжения производится амплитудное регулирование, при малых отклонениях напряжения — импульсное регулирование, а при промежуточных отклонениях напряжения — одновременно как амплитудное, так и импульсное регулирование.

Снижение гармонического искажения выходного напряжения при его стабилизации обеспечивается при помощи трёхфазного реверсивного выпрямителя путём изменения соотношения отстающего и опережающего амплитудного регулирования и степенью импульсного регулирования добавочного напряжения в функции обратной связи. Применение в системе управления амплитудно-импульсной модуляции позволяет улучшить качество выходного тока и напряжения, что открывает перспективы её использования в автономных электротехнических комплексах (например, таких как СЭС) [9, с. 65, 66]. К недостаткам данного метода можно отнести тот факт, что использование в схеме регулирования функции обратной связи может привести к нестабильности управления при возможной модификации энергосети. Кроме того, для использования активной фильтрации необходимо выделять дополнительное пространство, поскольку устройство должно регулировать высшие гармоники в каждой из трёх линий трёхфазной сети. Ещё одним недостатком рассматриваемого способа является проблема регулирования тока между различными активными фильтрами, каждый из которых может быть включён в одну и ту же цепь энергосистемы. При таком подключении каждый активный фильтр попытается скомпенсировать потери на другом фильтре.

Следует отметить, что нелинейные гармонические искажения в сети переменного тока чаще всего снижаются с помощью использования в системе активной фильтрации пассивных элементов, таких как автотрансформаторы и блоки конденсаторных батарей, которые на частотах отдельных гармоник могут вступать в резонанс напряжений или резонанс токов, увеличивая тем самым амплитуду гармонических искажений. Использование в качестве компенсации реактивной мощности на подстанциях конденсаторных батарей также может привести к резонансу. Вместе с тем правильный подбор значений индуктивности и ёмкости пассивных элементов при уже известных и измеренных гармонических искажениях может действовать в совокупности в качестве успокоительных контуров, изменяющих резонансную частоту и предотвращающих возникновение резонансных пиков. К сожалению, такие фильтры не могут подавлять изменяющийся спектр гармоник, поэтому возможно усиление амплитуд других некомпенсированных гармонических искажений вследствие резонанса, что приводит к сбоям в энергопитании групп энергоприёмников. Этот резонанс может возникать на шинах трансформатора, что приводит к резкому увеличению тока и изменению его гармонического состава в резонансном контуре. Примером предотвращения резонансных пиков может служить регулируемый резонансный контур [10].

На рис. 4 приведена высоковольтная трёхфазная энергосистема, получающая энергию от высоковольтной кабельной линии. Регулируемый резонансный контур, который включён между высоковольтной оболочкой кабеля и массой, содержит регулируемый резистор, конденсатор и индуктивность, соединённые параллельно. Регулируемый резистор является гасителем резонансных пиков, конденсатор выполняет роль преобразователя частоты и обеспечивает сдвиг резонансной

частоты, индуктивность выполняет роль стабилизатора напряжения для обеспечения ограничения аномальных всплесков напряжения на резонансном контуре.

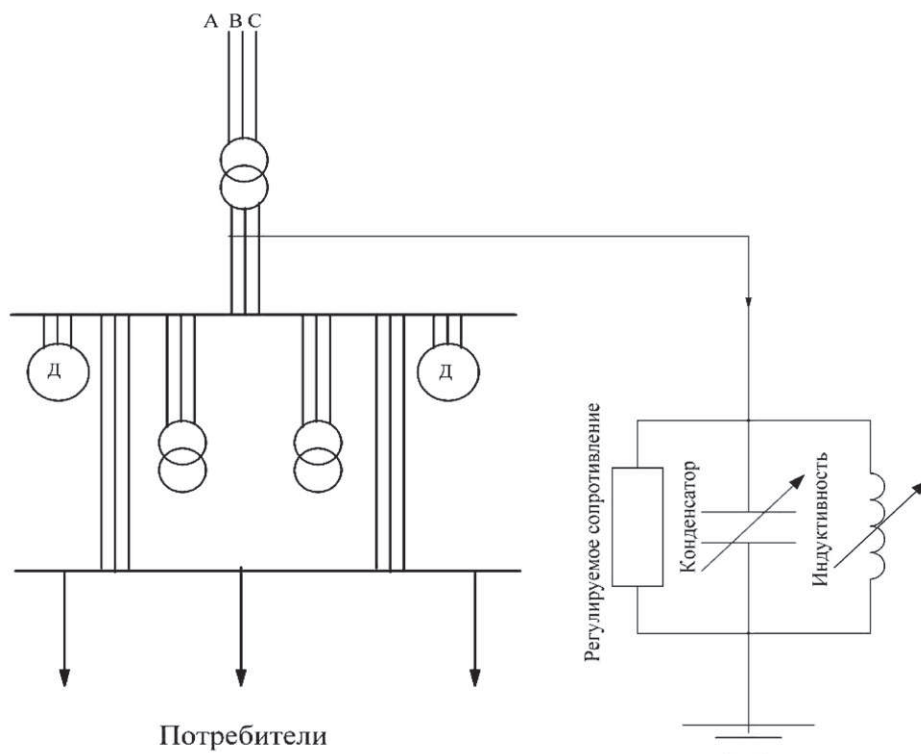


Рис. 4. Высоковольтная трёхфазная энергосистема с регулируемым резонансным контуром

На рис. 5 приведена схема поперечного сечения высоковольтного кабеля, применяемого в энергосистеме для передачи энергии, компонентами которого служат кабельные жилы. Каждую жилу окружает изолирующий экран. Подавление резонанса осуществляется на основе такого физического явления, как резонанс токов при параллельном соединении резистора, конденсатора и катушки индуктивности, где резистор, используемый для погашения резонансных пиков, будет нагрузкой в схеме резонансного контура, конденсатор обеспечивает сдвиг резонансной частоты, а катушка индуктивности по своей природе необходима для ограничения амплитудных значений гармонических токов. Правильный выбор ёмкости конденсатора и индуктивности катушки может снизить амплитуду гармоник в электросетях. Этот вывод можно доказать математически. Все приведенные далее рассуждения верны и для всех гармоник в отдельности других периодических напряжений.

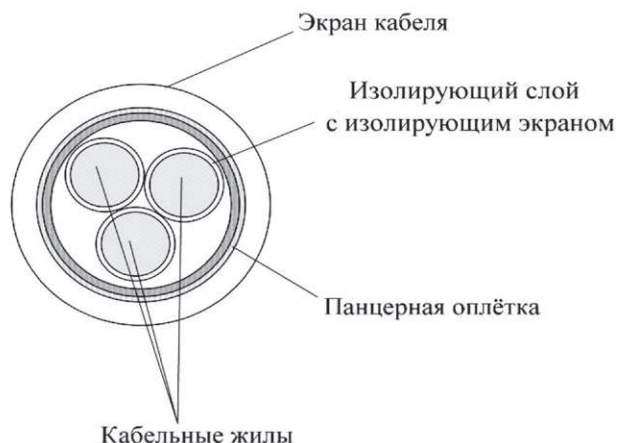


Рис. 5. Схема поперечного сечения высоковольтного кабеля

Сила тока, проходящая по цепи регулируемого резонансного контура, будет равна согласно первому закону Кирхгофа [11]:

$$I = I_R + I_C + I_L \quad (11)$$

где I_R — ток в контуре с резистором; I_C — ток в контуре с конденсатором; I_L — ток в контуре с индуктивностью.

Ток в контуре с конденсатором определяется по следующей формуле:

$$I_C = \frac{E_m}{Z_1} \cos(\omega t + \varphi_1), \quad (12)$$

где $Z_1 = X_C$ — полное сопротивление в цепи с конденсатором; φ_1 — сдвиг по фазе при ёмкостной нагрузке.

Ток в этом контуре

$$I_C = -\frac{E_m}{X_C} \sin(\omega t). \quad (13)$$

Ток в контуре с катушкой индуктивности определяется следующим образом:

$$I_L = \frac{E_m}{Z_2} \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (14)$$

где $Z_2 = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ — полное сопротивление в цепи с катушкой, если не пренебрегать её активным сопротивлением; φ_2 — сдвиг по фазе при индуктивной нагрузке.

Очевидно, что полный ток в цепи определяется суммой контурных токов в цепи с конденсатором и катушкой индуктивности:

$$I = \frac{E_m R}{Z_2^2} \cos \omega t + E_m \left(\frac{X_L}{Z_2^2} - \frac{1}{X_C} \right) \sin \omega t, \quad (15)$$

где $\frac{E_m R}{Z_2^2} \cos \omega t$ — активная составляющая тока; $E_m \left(\frac{X_L}{Z_2^2} - \frac{1}{X_C} \right) \sin \omega t$ — реактивная составляющая тока; X_C, X_L — реактивное сопротивление конденсатора и катушки соответственно; ω — циклическая частота.

Коэффициенты активной и реактивной мощности для полной цепи будут определяться следующим образом:

$$\begin{cases} \cos \varphi = \frac{ZR}{Z_2^2}; \\ \sin \varphi = Z \left(\frac{1}{X_C} - \frac{X_L}{Z_2^2} \right), \end{cases} \quad (16)$$

где Z — полное сопротивление в цепи с конденсатором и индуктивностью.

В таком случае полная проводимость цепи резонансного контура составит

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{Z_2^2} - \frac{2X_L}{X_C Z_2^2} + \frac{1}{X_C^2}}. \quad (17)$$

Имея полную проводимость цепи контура, можно найти амплитуду гармонического тока, которая будет выражена следующей формулой:

$$I_m = \frac{E_m}{Z} = E_m \sqrt{\frac{1}{Z_2^2} - \frac{2X_L}{X_C Z_2^2} + \frac{1}{X_C^2}}, \quad (18)$$

откуда видно, что изменение амплитуды гармонического тока в меньшую сторону станет возможным тогда, когда будет выполняться следующее неравенство:

$$\frac{2X_L}{X_C Z_2^2} > \frac{1}{X_C^2}. \quad (19)$$

Имея в виду, что реактивное сопротивление конденсатора зависит от циклической частоты и ёмкости $X_C = \frac{1}{\omega C}$, неравенство можно записать следующим образом:

$$C < \frac{2X_L}{\omega Z_2^2}. \quad (20)$$

Из приведенных выражений видно, что если изменять реактивные сопротивления конденсатора и катушки путём изменения ёмкости и индуктивности, можно добиться изменения амплитуды гармонического тока. Таким образом, необходимо иметь систему управления, которая должна контролировать и изменять ёмкость и индуктивность до тех пор, пока измеряемое амплитудное значение тока в сети не достигнет минимального значения, т.е. до тех пор, пока оно не будет способствовать подавлению резонанса.

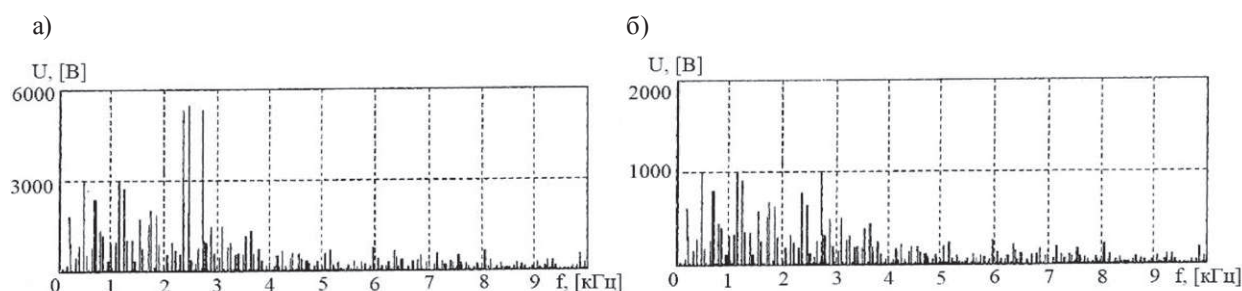


Рис. 6. Графики спектральной функции напряжения высоковольтной энергосистемы:
а — без использования регулируемого резонансного контура;
б — при использовании регулируемого резонансного контура

На рис. 6 приведены графики спектральной функции напряжения такой энергосистемы, которые отображают напряжения в линиях передач на 33 кВ, при этом по оси ординат отложена амплитуда напряжения, а по оси абсцисс — частота (0 – 10) кГц. На рис. 6 а можно заметить, что в частотном диапазоне приблизительно от 2 кГц до 3 кГц наблюдается несколько всплесков напряжения, указывающих на явление резонанса. На рис. 6 б заметно значительное снижение резонансных пиков при использовании регулируемого резонансного контура.

Необходимо отметить, что при проектировании системы энергоснабжения и применении в ней как активных, так и пассивных и активно-пассивных фильтров как методов для компенсации токов гармоник необходимо учитывать возможность возникновения резонансных явлений, что предполагает использование дополнительной аппаратуры. Совместное применение индивидуальной фильтрации в одной системе энергоснабжения для каждой из нагрузок в отдельности или совместное использование методов индивидуальной и централизованной фильтрации для устранения искажений может привести к тому, что регулирование тока между различными фильтрами приведёт к их неправильной работе вследствие того, что один фильтр будет компенсировать потери на другом. Бесконтрольная установка активных фильтров компенсации высших гармоник не способна подавить весь спектр гармонических искажений. В современном мире пока ещё не существует фильтра, адаптированного под все электроэнергетические системы, поэтому производителям таких устройств приходится проектировать фильтры для каждой системы электроснабжения в отдельности.

Кроме того, в случае использования совместно с активными фильтрами дополнительных пассивных элементов или при использовании различной модификации этих элементов как средства повышения коэффициента мощности, при проектировании этих фильтров не учитывают явления аномальных всплесков напряжений, возникающих вследствие резонанса. В связи с этим

возникает необходимость создания нового устройства управляемого активно-резонансного типа, которое позволило бы повысить надёжность и качество передаваемой электроэнергии и, в большей степени, уменьшило влияние электромагнитной несовместимости нелинейных потребителей. При этом необходимо учитывать, что такое устройство должно обладать наименьшими массогабаритными показателями и иметь возможность автоматически подстраиваться под особенности различных систем энергоснабжения, как береговых, так и судовых автоматизированных электроэнергетических систем.

Список литературы

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Изд-во Стандартиформ, 2014. — 20 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов: в 2 т. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2014. — 1315 с.
3. Маслович С. Ф. Математическое моделирование параметров надёжности и электропотребления / С. Ф. Маслович, В. Н. Галушко, С. В. Бахур // Проблемы физики, математики и техники. — 2014. — № 2 (19). — С. 77–83.
4. Потапов А. И. Контроль, диагностика, обеспечение качества электроэнергии / А. И. Потапов, А. А. Пугачёв, И. А. Потапов. — СПб.: Изд-во ДЕАН, 2014. — 840 с.
5. Гриб О. Г. Актуальные задачи определения долевого участия в ответственности за нарушение качества электрической энергии / О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, П. Г. Щербакова // Научные труды ДонНТУ. Серия: Электротехника и энергетика. — 2013. — № 1 (14). — С. 77–82.
6. Пат. 2514439 Российская Федерация, МПК Н 02 J 3/01. Устройство компенсации высших гармоник / В. Н. Мищеряков, Д. В. Безденежных, М. М. Хабибуллин, О. В. Мищерякова; Заявитель и патентообладатель Липецк. ФГБОУ ВПО ЛГТУ. — № 2012133840/07; Заявлено 07.08.2012; Оpubл. 27.04.2014 // Бюл. — 2014. — № 12.
7. Малафеев С. И. Теория автоматического управления: учебник для вузов / С. И. Малафеев, А. А. Малафеева. — М.: Академия, 2014. — 377 с.
8. Лебедев В. В. Активный вольтодобавочный компенсатор нелинейных искажений напряжения судовой сети: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Лебедев. — Н. Новгород: Нижегородский гос. тех. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2014. — 19 с.
9. Горева Т. С. Построение модели фильтрокомпенсирующего устройства импульсных и флуктуационных помех, возникающих в судовых системах электроснабжения, с идентификацией в ортогональном вейвлет-базисе / Т. С. Горева, С. Е. Кузнецов, Н. Н. Портнягин // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3. — С. 63 – 68.
10. Пат. 2508589 Российская Федерация, МПК Н 02 J 3/01, Н 02 Н 9/04. Система и способ для подавления резонанса / К. М. Зилер, Э. В. Ларсен, А. С. Ахиллес; Заявитель и патентообладатель СПб. Дженерал Электрик Компани. — № 2009141805/07; Заявлено 13.11.2010; Оpubл. 27.02.2014 // Бюл. — 2014. — № 6.
11. Аполлонский С. М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник для вузов / С. М. Аполлонский. — СПб.: Лань, 2012. — 592 с.