

КОМПЕНСАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С ПОМОЩЬЮ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Надежность и эффективность работы электрооборудования зависит от качества электрической энергии в распределительных сетях. Ключевым вопросом обеспечения качества энергии является проблема высших гармоник. Проблема возникла в связи с широким внедрением силовой электроники как наиболее эффективного средства обеспечения требуемых режимов работы электромеханических и электротехнологических комплексов.

В работе с помощью средств Simulink системы MATLAB анализируется влияние высших гармоник на качество энергии, рассматривается принцип работы параллельного активного фильтра на основе алгоритма прямого управления током.

Nowadays, the most serious roadblock which must be overcome for securing high quality of power in distribution mains is high harmonics generation by nonlinear loads. The problem is imposed by widespread application of power electronics as the most effective tool to boost the efficiency of electromechanical systems. Power electronics converters pollute the distribution networks with harmonics that aggravate the characteristics of electrical equipment and reduce its lifetime. Power filters are supposed to be the most effective means of eliminating negative high harmonics influence.

Simulink tools are used to study the impact of electronics equipment on power quality. The performance of active power filter with direct current control algorithm to generate current reference is under consideration.

В связи с широким применением средств силовой электроники помимо гармоник, генерируемых ферромагнитными элементами, в распределительных сетях усиливается влияние гармоник, обусловленных особенностями ключевых режимов выпрямителей, инверторов, преобразователей частоты, преобразователей уровней напряжения и других блоков [2]. Генерирование нелинейными приемниками высших гармоник тока приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик электрооборудования. Одной из причин является искажение синусоидальной формы напряжения.

Отклонение от симметричного синусоидального режима обусловлено конечным

значением мощности источника энергии в точке питания распределительной сети $S_{кз}$ (рис.1) и зависит от коэффициента включения K_p нелинейной нагрузки мощностью P_d :

$$K_p = S_{кз} / P_d; \quad S_{кз} = 3U_{\phi}^2 / |Z_i|; \quad Z_i = R_i + j\omega L_i,$$

где Z_i – внутреннее сопротивление эквивалентного источника; U_{ϕ} – фазное напряжение.

С увеличением мощности нелинейной нагрузки возрастает падение напряжения на внутреннем сопротивлении Z_i , обусловленное несинусоидальными токами. Это приводит к появлению в спектре напряжения высших гармоник, например, с номерами $m = 6n \pm 1$, $n = 1, 2, 3 \dots$, если нагрузкой служит шестипульсный выпрямитель.

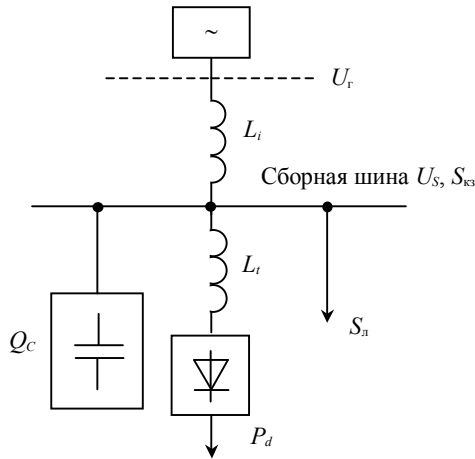


Рис.1. Эквивалентная схема замещения сети с нелинейной нагрузкой

Количественной оценкой уровня несинусоидальности трехфазной системы напряжений и токов служат коэффициенты несинусоидальности тока K_{ih} , напряжения K_{uh} и коэффициент искажения мощности K_{sh} :

$$K_{ih} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}}; \quad K_{uh} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}};$$

$$K_{sh}^2 = \frac{S_h^2}{S_1^2}; \quad K_{sh}^2 = K_{ih}^2 + K_{uh}^2 + (K_{ih}K_{uh})^2,$$

где U_j и I_j – действующие значения напряжения и тока j -й гармоники; S_h – дополнительная мощность, связанная с высшими гармониками.

Несинусоидальность напряжения источника приводит к нарушению режима работы электрооборудования, рассчитанного на синусоидальный режим: возникают сбои в системах автоматического управления (в частности, в блоках силовой электроники), происходит нарушение работы систем релейной защиты, компенсации дуговых замыканий, ухудшаются показатели электромашиных комплексов.

Другим важным следствием высших гармоник в сетях является рост мощности потерь в стали, в основном, за счет вихревых токов. Это приводит к постоянной тепловой перегрузке трансформаторов, ухудшению изоляционных свойств и снижению

срока службы в зависимости от степени превышения температуры относительно номинальной. Подобные процессы характерны и для конденсаторов, в которых рост внутренних источников тепла обусловлен диэлектрическими потерями, пропорциональными частоте.

В соответствии с принятыми нормами [1], коэффициент гармоник напряжения на зажимах приемников не должен превышать 5%. Расчет высших гармоник в разветвленных сетях при наличии группы нелинейных потребителей является сложной задачей, решение которой затруднено наличием многочисленных резонансов, изменяющейся структурой сети, взаимным влиянием нелинейных потребителей. В таких условиях оценку уровня несинусоидальности токов и напряжений целесообразно проводить с помощью компьютерного моделирования сетей с использованием апробированных моделей основных элементов электротехнических комплексов и средств измерения параметров их режима.

Рассмотрим ряд вопросов оценки высших гармоник и методов их компенсации с помощью средств Simulink системы MATLAB. В качестве эквивалентного источника высших гармоник выбран шестипульсный выпрямитель мощности P_d , который питается от источника мощностью короткого замыкания $S_{кз} = 260$ МВ·А, характерной для трансформаторов ТДНС 16000 35/6,3/6,3. К источнику подключен также блок конденсаторов мощностью Q_c , квазилинейная нагрузка мощностью S_n с эффективным коэффициентом мощности $\chi = \cos \varphi_e$. Цепь предвключения нелинейной нагрузки учитывает индуктивность рассеяния трансформатора и/или индуктивность реактора.

Результаты моделирования показывают, что при коэффициенте включения нелинейной нагрузки $K_p = 100$ коэффициент несинусоидальности напряжения $K_{uh} = 3\%$, при $K_{ih} = 22\%$ – соответствует принятым нормам.

При подключении компенсирующей установки Q_c в сети образуется параллельный контур, в котором возникает резонанс

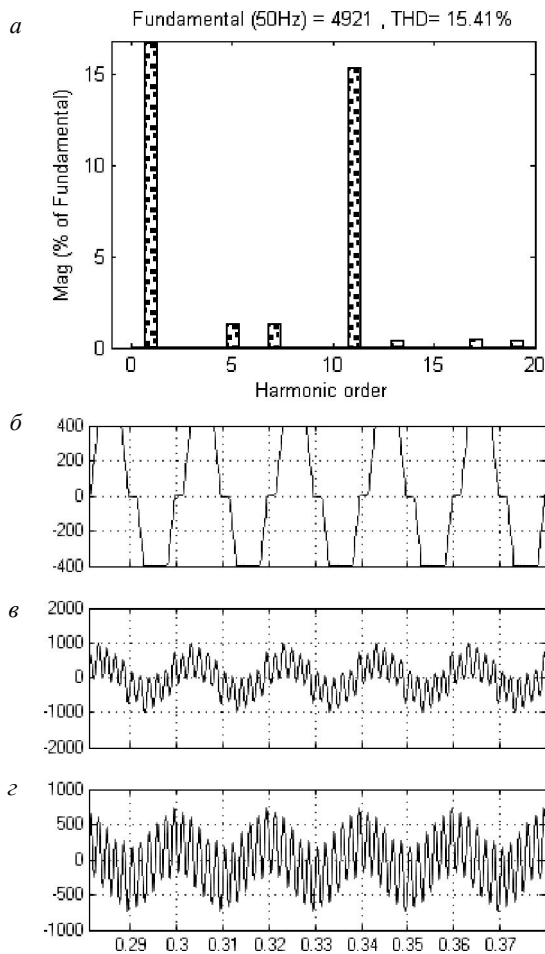


Рис.2. Спектр напряжения (а) и осциллограммы токов в линии (б), трансформаторе (в) и конденсаторе (г) при резонансе токов на 11-й гармонике

токов на частоте $\omega_p = \omega_s \sqrt{S_{кз}/Q_C}$, где ω_s – частота сети. Следствием резонанса на 11-й гармонике является возрастание коэффициента несинусоидальности напряжения до значения $K_{uh} = 15\%$ из-за роста эквивалентного сопротивления источника $R_e = \rho^2/R_i$, где $\rho = \sqrt{L_i/C}$ – характеристическое сопротивление, вызывающее увеличение содержания 11-й гармоника в спектре напряжения (рис.2, а).

При практически неизменной форме тока в линии ($K_{ih} = 20\%$) коэффициенты несинусоидальности токов трансформатора и конденсатора вследствие высокой добротности контура составляют 98 и 170 % соответственно (рис.2). При резонансе на 19-й гармонике значение $K_{uh} = 9\%$ также выше

предельно допустимого. Аналогичные явления имеют место в сетях низкого напряжения, в которых емкость компенсирующих установок может достигать 1000 мкФ.

Снижение влияния высших гармоник путем их шунтирования с помощью резонансных и полосовых фильтров сопряжено с рядом недостатков, к которым следует отнести высокую чувствительность характеристик фильтров к изменению их параметров, перекомпенсацию реактивной мощности, появление новых резонансов при изменении структуры сети, перенапряжение и ряд других.

В соответствии с современной тенденцией развития энергетических систем наиболее перспективными средствами обеспечения качества напряжения в сетях следует считать силовые активные фильтры (САФ), построенные на базе элементов силовой электроники и управляемые с помощью средств микропроцессорной техники.

Силовые активные фильтры последовательного типа могут быть использованы для компенсации потерь напряжения, параллельный активный фильтр – для компенсации реактивной мощности и высших гармоник, гибридный фильтр – для компенсации несимметрии трехфазной системы напряжений.

Принцип работы САФ параллельного типа (рис.3) основан на инжектировании в сеть тока i_F в противофазе с высшими гармониками и реактивной составляющей основной гармоники тока нелинейной нагрузки за счет дискретного подключения накопительного конденсатора к сети. Управление ключами инвертора осуществляется системой автоматизированного управления (САУ), работа которой синхронизируется с сетью с помощью блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Работа САФ зависит от метода формирования опорных токов, метода управления и параметров инвертора. Одним из этапов проектирования САФ является создание его компьютерной модели. При реализации прототипа в среде Simulink был использован

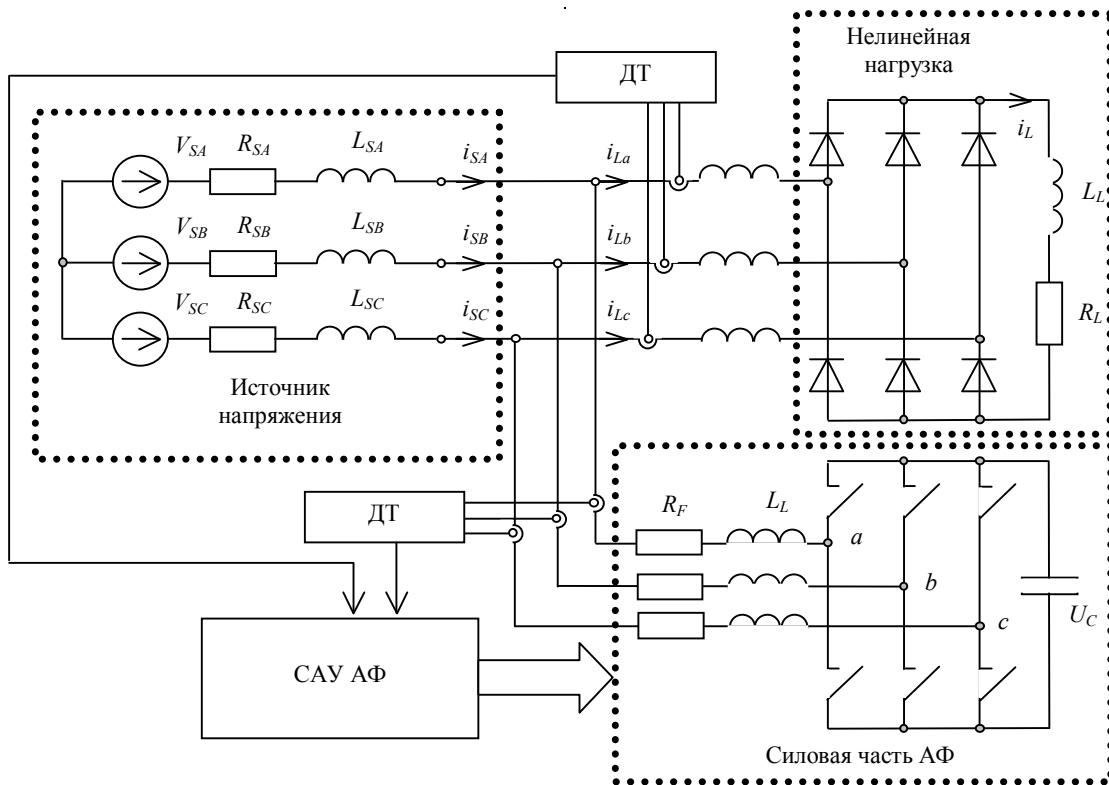


Рис.3. Схема параллельного активного фильтра

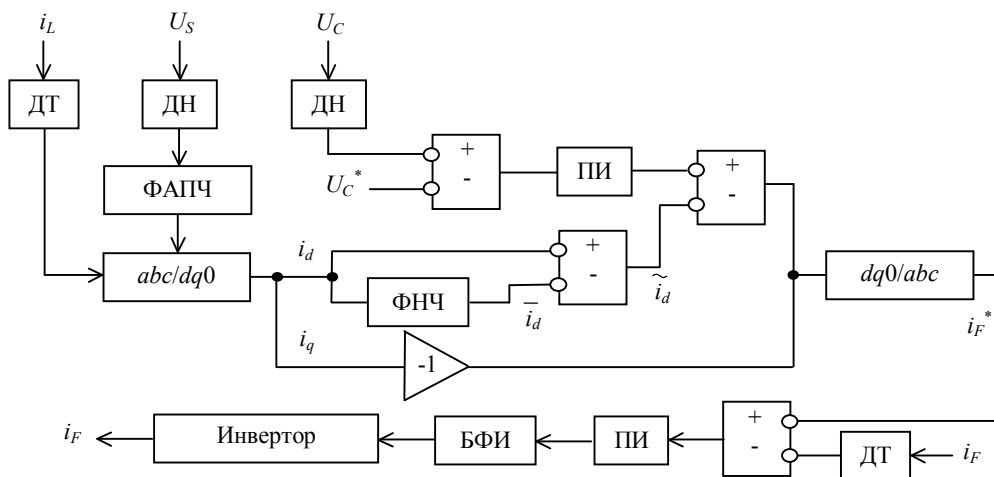


Рис.4. Блок-схема формирования опорных сигналов управления САФ параллельного типа
 ДТ и ДН – датчики тока и напряжения; ПИ – ПИ-регулятор; ФНЧ – фильтр нижних частот

алгоритм прямого управления током фильтра [3] (рис.4).

Формирование опорных сигналов САУ осуществлялось с использованием вращающейся системы координат $dq0$ (рис.5) путем

выделения переменной составляющей \tilde{i}_d тока нагрузки $i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d$ и инвертирования составляющей i_q . Сформированный сигнал трансформируется в неподвижную систему

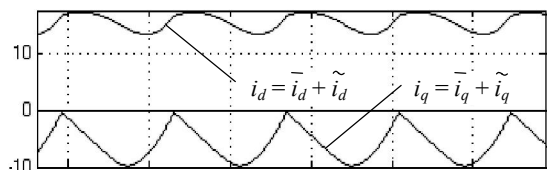


Рис.5. Осциллограммы токов нагрузки во вращающейся системе координат

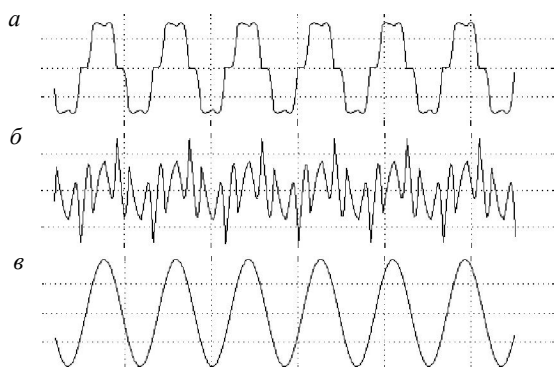


Рис.6. Токи нагрузки (а), фильтра (б) и сети (в)

координат *abc* и сравнивается с измеренным током фильтра.

Сигнал ПИ-контроллера посредством ШИМ-блока формирования импульсов (БФИ) управляет работой инвертора и обес-

печивает требуемый эффект регулирования $\tilde{i}_d = 0$ и $i_q = 0$ (рис.6).

Реализация САФ в сетях среднего класса напряжения может быть осуществлена с использованием согласующих трансформаторов, параллельно-последовательного включения фильтров, использования многоуровневых инверторов [2]. Широкие перспективы использования САФ для решения задач повышения качества энергии в системах электроснабжения имеет новое поколение элементов силовой электроники на базе SiC-технологии, рассчитанное на напряжение несколько десятков киловольт.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 1997.
2. Пронин М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи / М.В.Пронин, А.Г.Воронцов; ОАО «Электросила». СПб, 2003.
3. Singh B. Performance Comparison of Two Current Control Techniques Applied to an Active Filter / B.Singh, K.Al-Haddad, A.Chandre // 8th Int. Conf. On harmonics and Quality of Power. 1998. Vol.I.