

Использование метода гармонического баланса для расчета несинусоидальных и несимметричных режимов в системах электроснабжения.

Авторы: Кучумов Л.А., Харлов Н.Н., Карташвили Н.Ю., Пахомов А.В., Кузнецов А.А.

Излагаются алгоритмы применения метода гармонического баланса для построения программы расчета несинусоидальных и несимметричных режимов в системах электроснабжения произвольной конфигурации с наиболее распространенными нелинейными элементами типа управляемых преобразователей и шунтов намагничивания трансформаторов. Обсуждается круг задач, эффективно решаемых с использованием разработанного программного комплекса. Приводятся примеры конкретных расчетов.

Ключевые слова: метод гармонического баланса, программная реализация, расчеты квазиустановившихся несинусоидальных и несимметричных режимов, управляемые преобразователи, шунты намагничивания.

It is given the algorithms based on harmonic balance method for computer programmes to calculate of nonsinusoidal and unsymmetric modes in supply systems of arbitrary structure with the most frequent nonlinear elements such as controlled convertors and magnetizing circuits of transformers. The area of problem solving with use of developed software complex are discussed. A few examples are showed.

Keywords: harmonic balance method, software complex, quazi-steady-state, nonsinusoidal and unsymmetric modes calculations, controlled convertor, magnetizing circuit.

Постановка задачи. В настоящее время одним из основных инструментов решения широкого круга задач, относящихся к обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования в системах электроснабжения является математическое моделирование. Проведение натурных экспериментов также является непременной составляющей при решении вопросов ЭМС, хотя бы потому, что только таким путем можно оценить фактическое состояние в системе электроснабжения до и после проведения оптимизации условий ЭМС. Но, в силу известных ограничений по проведению эксперимента и его трудоемкости задачи оптимизации обычно возлагаются на математическое моделирование. В настоящей работе раскрывается разработанный авторами подход к созданию математических моделей для расчета, анализа и оптимизации режимов электрических систем с нелинейными нагрузками, при наличии источников гармонических возмущений и несимметрии токов и напряжений.

Наиболее простыми, отработанными и широко применяемыми на настоящем этапе знаний являются методы определения условий ЭМС, основанные на анализе результатов расчета квазиустановившегося режима работы исследуе-

мой электрической сети. Такой режим может быть получен, например, путем решения дифференциальных уравнений, описывающих трехфазную электрическую сеть с нелинейными элементами [1]. Однако высокая трудоемкость подготовки исходных данных и обработки полученных результатов накладывает существенные ограничения на размеры исследуемых схем. Известные проблемы сходимости и накопления погрешности приводят к необходимости как можно более точного определения начальных условий расчета. Кроме того, оказывается затруднен учет частотных зависимостей параметров элементов электрической сети, требующий применения громоздких схем замещения для каждого из учитываемых элементов [2], либо использования методов численного расчета со специальными дискретными моделями элементов [3].

В связи с этим получили значительное развитие методы непосредственного расчета установившегося несинусоидального режима, основанные на известных методах расчета режимов на основной частоте, адаптированных к необходимости в данном случае иметь совокупность решений на всех учитываемых высших гармониках. Для использования этих методов необходимо корректно задавать в узлах электрической сети с нелинейными элементами векторы высших гармоник токов, генерируемых этими элементами.

В настоящее время на практике большое распространение получили программы с упрощенным представлением нелинейных элементов в виде источников тока высших гармоник [4, 5]. Сложной проблемой при таком моделировании элементов является правильная фазировка векторов высших гармоник источников тока, замещающих нелинейные элементы и включенных, в общем случае, в различные узлы электрической сети. Разрабатывались варианты решения такой задачи путем предварительного расчета режима сети на первой гармонике при последующей привязке векторов высших гармоник к вектору первой гармоники питающего напряжения в соответствующем узле [4].

Но более перспективным для расчета квазиустановившихся режимов, по мнению авторов, является метод гармонического баланса [6, 7, 8, 9, 10, 11], обеспечивающий учет взаимовлияния нелинейного элемента и питающей сети, автоматический учет фазировки векторов высших гармоник, а также, позволяющий предельно упростить учет частотных зависимостей параметров элементов электрической сети. Общая идея этого метода состоит в представлении всех переменных нелинейных дифференциальных уравнений усеченными рядами Фурье и подстановке их в исходные дифференциальные уравнения. В результате получается нелинейная система алгебраических уравнений относительно компонентов векторов гармоник исходных переменных, которая решается итерационным способом. Этот метод, как показала практика, эффективен в тех случаях, когда временные зависимости режимных величин могут быть аппроксимированы сравнительно небольшим числом гармоник.

Обратимся к рис.1, на котором показаны возможные схемы включения нелинейных элементов в некоторой электрической сети. Нелинейные элементы здесь условно представлены в виде продольно ($HЭ_i$ и $HЭ_j$) и поперечно ($HЭ_k$) включенных двухполюсников (в общем случае многофазных).

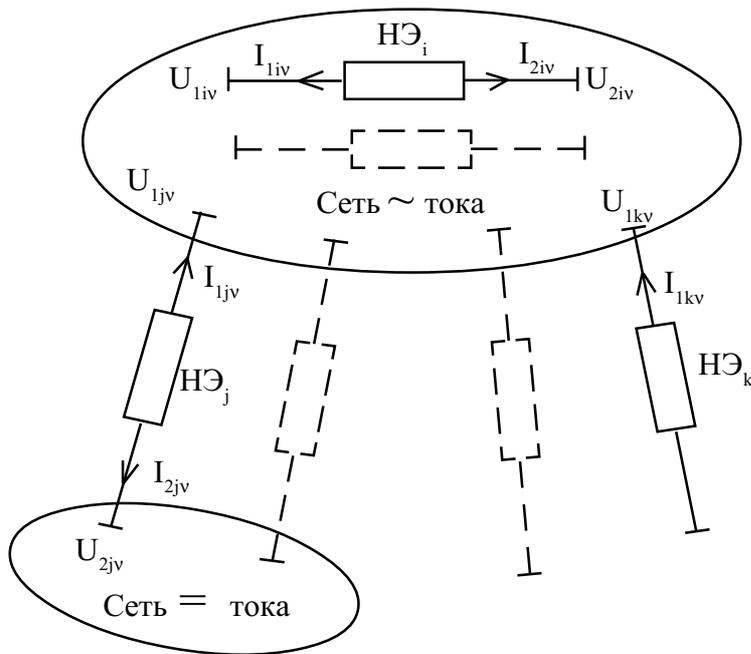


Рис. 1. Пример сети с включенными нелинейными элементами.

Примерами продольно включенных нелинейных элементов являются преобразователи, работающие на сеть постоянного тока (НЭ_i), вставки постоянного тока (НЭ_j), автономные инверторы. Для расчета таких элементов необходимо знание балансирующих переменных (токов и напряжений) на обоих выводах (1 и 2) двухполюсников. Для описания поперечного (концевого) элемента (НЭ_k) достаточно знания балансирующих переменных только в узле его подключения. Примерами

поперечных элементов являются неуправляемые и управляемые мостовые преобразователи с заданными параметрами контура постоянного тока (наиболее часто эту цепь замещают индуктивностью, активным сопротивлением и противоЭДС), трехфазные шунты намагничивания трансформаторов.

Авторы реализовали в виде работающего вычислительного комплекса “ГАММА” метод гармонического баланса при расчете несинусоидальных режимов в электрических сетях с поперечными нелинейными элементами типа преобразователей различной пульсности и шунтов намагничивания трансформаторов [9, 10, 11, 12]. Реализован учет пофазной несимметрии как самой сети, так и параметров нелинейных элементов. Последнее требует применения процедуры гармонического баланса в трех фазах балансирующего узла.

Метод гармонического баланса применительно к расчету режимов электрических сетей с нелинейными элементами. Упрощенная схема метода гармонического баланса, использованная авторами в программном комплексе “ГАММА”, представлена на рис.2. Этот метод предполагает чисто алгебраическую постановку задачи расчета электрической сети с нелинейными элементами и, поэтому, при использовании ЭВМ позволяет достаточно быстро получить решение.

Вычислительный алгоритм представляет собой два итерационных процесса, первый из которых основан на использовании уравнений баланса узловых токов на учитываемых гармониках и служит для определения узловых напряжений в электрической сети. Второй итерационный процесс находится внутри первого и предназначен для решения систем нелинейных алгебраических уравнений с целью определения параметров режимов работы нелинейных нагрузок при рассчитанных на предыдущей итерации гармонических спектрах напряжения на их зажимах.

Основная специфика разработанной программы расчета несинусоидальных режимов обусловлена применением фазной системы координат при математическом описании всех элементов электрической сети. Это позволяет облегчить формирование математических моделей элементов электрической сети, упростить переход к расчету режимов с измененной конфигурацией сети, в том числе приводящих к возникновению несимметрии процессов по фазам. Наличие фазных координат позволяет пользователю легко представлять переменные и в широко используемых на практике координатах симметричных составляющих.

Итерационная формула основного расчетного процесса, использующая преобразованные уравнения установившегося режима, записывается в следующем виде:

$$\dot{U}_{vabc}^{k+1} = \dot{U}_{vabc}^k - \dot{Y}_{vabc}^{-1} (\text{diag}\{\dot{I}_{зад.v}^{abc}\} + \dot{Y}_{vabc} \dot{U}_{vabc}^k) \quad (1)$$

где \dot{Y}_{vABC} - трехфазная матрица узловых проводимостей, соответствующая v-ой гармонике (включая основную); \dot{U}_{vABC}^k , \dot{U}_{vABC}^{k+1} - векторы напряжений узлов, соответствующие v-ой гармонике

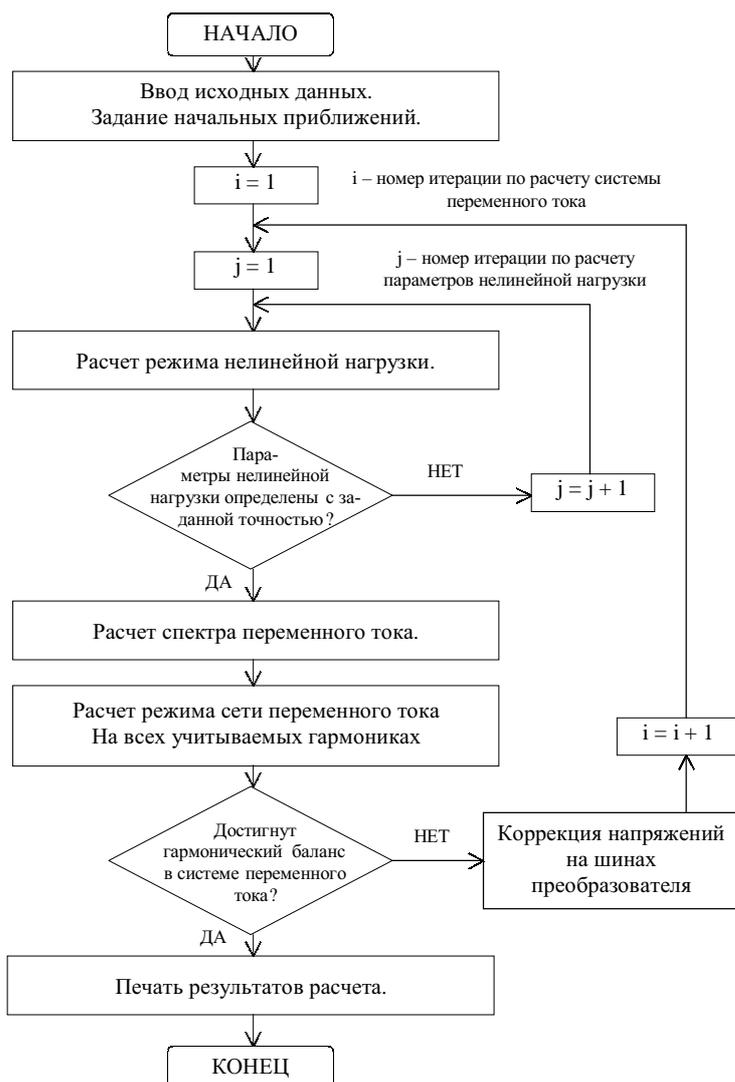


Рис. 2. Блок схема алгоритма метода гармонического баланса.

на k-ом и k+1-ом шаге итерационного процесса; $\text{diag}\{\dot{I}_{зад.v}^{ABC}\}$ - диагональная матрица задающих трехфазных токов нелинейных элементов.

В программе существует возможность учета изменения активных, индуктивных и емкостных сопротивлений всех элементов от частоты. Такой учет производится либо по заранее заданным функциональным зависимостям, либо по параметрам заданным в табличной форме [10, 11].

Расчет задающих трехфазных токов от нелинейных и несимметричных (в общем случае) нагрузок проводится во втором итерационном цикле вычислительного алгоритма метода гармонического баланса и осуществляется по излагаемым ниже специально разработанным алгоритмам, позво-

ляющим учитывать специфические особенности конкретных нелинейных элементов.

Шестипульсный управляемый преобразователь как базовый элемент для преобразователей с более сложной схемой. Трехфазные мостовые управляемые шестипульсные преобразователи являются основным видом преобразователей, применяемых в промышленности. Этот преобразователь и его схема замещения при математическом моделировании процессов, связанных с анализом высших гармоник, может быть принят в качестве базового для преобразователей более высокой пульсности. Последние могут быть смоделированы на основании использования базовой модели с помощью корректного учета схем замещения преобразовательных трансформаторов и соответствующего выбора узлов, в которых осуществляется процедура гармонического баланса.

Формирование математической модели преобразователя проводилось при учете следующих допущений: вентили идеальные; активные сопротивления преобразовательных трансформаторов и, при необходимости, их шунты намагничивания выносятся во внешнюю сеть переменного тока; цепь постоянного тока в общем случае представлена контуром с активным сопротивлением, индуктивностью и противоЭДС.

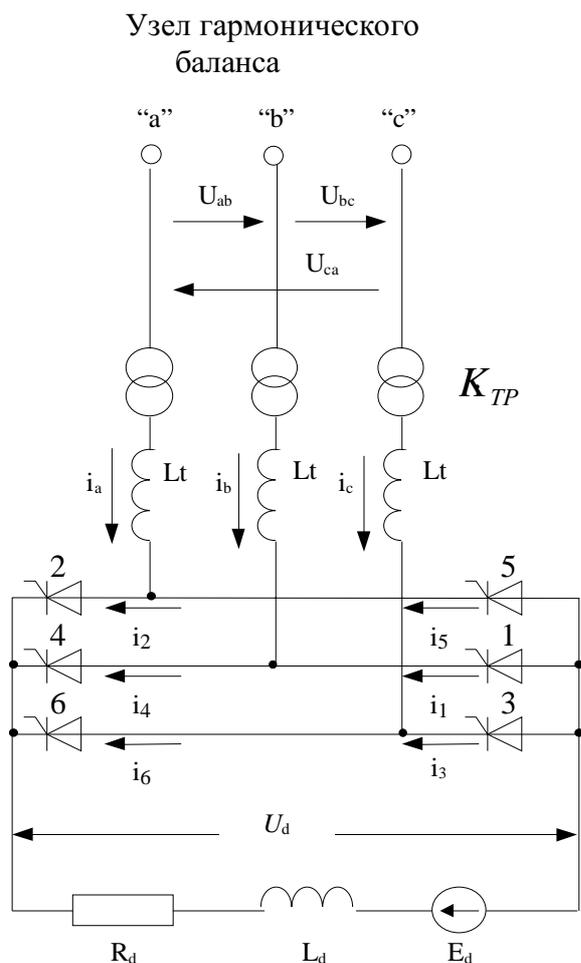


Рис. 3. Расчетная схема шестипульсного преобразователя.

На рис.3 представлена принципиальная схема трехфазного мостового преобразователя с комплексным, в общем случае, коэффициентом трансформации K_{TP} преобразовательного трансформатора. Здесь: u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} - линейные напряжения системы переменного тока в точке гармонического баланса, удаленной от зажимов преобразователя за чисто индуктивным сопротивлением L_t ; L_t - учитываемая в расчетной модели индуктивность рассеяния преобразовательного трансформатора (возможная несимметрия индуктивностей может быть учтена в математической модели несимметричной цепи переменного тока); i_a , i_b , i_c - фазные токи во вторичной обмотке преобразовательного трансформатора; $i_1 - i_6$ - токи в вентилях; u_d , i_d - мгновенные значения выпрямленных напряжения и тока; R_d , L_d , E_d - активное сопротивление, индуктивность и среднее значение противоЭДС в цепи выпрямленного тока. Возможен также учет других схем на стороне постоянного тока, в том числе замещение этой цепи источником идеально

сглаженного тока.

Напряжение сети переменного тока на входе модели преобразователя в общем случае полагается несимметричным, возможна также несимметричная подача импульсов управления на вентили. Квазиустановившийся режим работы преобразователя в этом случае существует при условии повторяемости процессов через 180 электрических градусов, при дополнительном условии подачи управляющих импульсов на вентили одной фазы также через 180° и, в общем случае, неодинаковых интервалах подачи импульсов на вентили смежных фаз. (В случае симметрии питающего напряжения и импульсов управления преобразователем достаточно было бы иметь интервал повторяемости 120°).

Для вывода уравнений несимметричного установившегося режима работы преобразователя использовался основной режим горения вентилей моста по 2 и по 3. Этот режим описывается следующими соотношениями и уравнениями, в которых линейные напряжения, фазные токи и токи вентилей имеют формы, характерные для несимметричной трехфазной системы:

1. Линейные напряжения в точке гармонического баланса представлены в форме рядов Фурье:

$$U_{AB} = \sum_{v=1}^K U_{ABv} \cos(K\omega T + \varphi_{ABv}), \quad U_{BC} = \sum_{v=1}^K U_{BCv} \cos(K\omega T + \varphi_{BCv}), \quad U_{CA} = \sum_{v=1}^K U_{CAv} \cos(K\omega T + \varphi_{CAv}) \quad (2)$$

где k - количество учитываемых в расчете гармоник;

2. Связь токов вентилей и фаз преобразователя:

$$i_1 + i_3 + i_5 = i_2 + i_4 + i_6 = i_a, \quad i_a = i_2 - i_3, \quad i_b = i_4 - i_1, \quad i_c = i_6 - i_3, \quad i_a + i_b + i_c = 0. \quad (3)$$

3. Уравнения равновесия ЭДС на первом отрезке интервала повторяемости:

а) в коммутационном интервале, когда ток проводят вентили 1,2,3:

$$\begin{aligned} L_T \frac{d i_1'}{dt} + L_D \frac{d i_2'}{dt} + R_D i_2' + L_T \frac{d i_3'}{dt} &= U_{AB} - E_D, \\ L_T \frac{d i_2'}{dt} + L_D \frac{d i_3'}{dt} + R_D i_3' + L_T \frac{d i_1'}{dt} &= U_{BC} - E_D. \end{aligned} \quad (4)$$

б) в межкоммутационном интервале при работе вентилей 2 и 3:

$$L_T \frac{d i_2''}{dt} + L_D \frac{d i_3''}{dt} + R_D i_3'' + L_T \frac{d i_1''}{dt} = U_{AB} - E_D. \quad (5)$$

Аналогичные дифференциальные уравнения записываются для последующих отрезков интервала повторяемости. На втором отрезке записываются уравнения при работе вентилей 2, 3 и 4 в коммутационном интервале, и вентилей 3, 4 – в межкоммутационном интервале. На третьем отрезке уравнения записываются для вентилей 3, 4, 5 и 4, 5 соответственно.

В Приложении представлена система алгебраических уравнений, использованная авторами для построения математической модели квазиустановившегося режима работы преобразователя. Она включает в себя уравнения, записанные с учетом непрерывности выпрямленного тока и условий коммутации вентилей в моменты их включения и выключения (с учетом падения напряжения в учитываемой индуктивности L_T), уравнение, определяющее среднее значение вып-

рямленного тока I_d и соотношение, связывающее I_d с выпрямленным напряжением U_d . Совместное решение уравнений (П.1)-(П.4) с учетом соотношений (2)-(5) полностью описывает квазиустановившийся несинусоидальный и несимметричный режим работы преобразователя при условии существования непрерывного выпрямленного тока.

Для определения спектра переменного тока преобразователя необходимо путем решения системы уравнений (П.1)-(П.4) определить параметры режима работы преобразователя. Такими параметрами при его несимметричной работе являются: моменты начала $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и окончания $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ коммутации; постоянные составляющие выпрямленного тока и напряжения I_d и U_d ; постоянные интегрирования ($A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{31}, A_{32}, A_{33}$) и искусственные переменные $V_{11}, V_{12}, V_{13}, V_{21}, V_{22}, V_{23}$ (цель введения последних пояснена в Приложении). Количество режимных параметров модели преобразователя с учетом несимметрии питающего напряжения составляет 23, в то время, как число уравнений, описывающих режим, равно 20. Следовательно, для определения режима работы преобразователя три его параметра (независимые) должны быть заданы.

С целью построения универсального вычислительного алгоритма разделение параметров режима на зависимые и независимые производится в процессе решения в соответствии с конкретной задачей. Система (П.1)-(П.4) позволяет учитывать все возможные на практике варианты задания исходной информации о режиме работы преобразователя. С целью универсализации выбора независимых переменных при расчете параметров режима работы была разработана взаимосвязанная система алгоритмов.

Согласно этой системе, в качестве независимых может быть задано разное количество режимных параметров, зависящее, в первую очередь, от представления нагрузки на стороне постоянного тока. Если параметры R_d и E_d цепи постоянного тока известны, задается только один независимый режимный параметр (α - фазовое управление преобразователем; δ - то же для инвертора; I_d - управление по току; U_d - управление по напряжению). Если же параметры цепи постоянного тока неизвестны, должны быть заданы два параметра режима работы преобразователя (I_d, α - управление по току; U_d, α - управление по напряжению; U_d, I_d - управление по мощности на постоянном токе; I_d, δ либо U_d, δ - то же для режима инвертора). В обоих описанных выше случаях для обеспечения корректного решения системы уравнений на каждой из итераций полагаются известными параметры V_{11}, V_{12} и V_{13} (на первой итерации они полагаются равными 0, что соответствует режиму неуправляемого преобразователя, а на последующих итерациях их значения уточняются на основании предыдущего расчета). Избыточность в задании независимых переменных способствует ускорению итерационного процесса получения квазиустановившегося режима.

Известно, что надежность и быстрдействие нахождения корней системы нелинейных алгебраических уравнений зависит как от методов, используемых для решения поставленной задачи, так и от характера исследуемых функций. Одним из достаточно эффективных методов решения подобных задач является

метод Ньютона. Однако, как показывает практика, названный метод наиболее эффективен для “гладких” функций и функций, для решения которых с высокой степенью точности получены начальные приближения.

В связи с этим авторами был предложен рациональный алгоритм определения параметров режима работы преобразователей, согласно которому первый этап расчета используется для определения начальных приближений и проводится при допущении об идеальной сглаженности выпрямленного тока $X_\beta = \infty$. Подстановка $X_\beta = \infty$ в уравнения (П.1)-(П.4) приводит к их значительному упрощению, результатом которого является система, не требующая совместного решения. Все неизвестные последней могут быть найдены в результате последовательного решения отдельных уравнений. На втором этапе решается общая система уравнений преобразователя (П.1)-(П.4) при использовании в качестве начальных приближений полученных ранее значений. Окончательным результатом расчета преобразователя являются гармонические спектры переменного тока каждой фазы преобразователя и спектр его выпрямленного тока. Для их получения формируются кривые токов во временной плоскости для каждого из интервалов отрезка повторяемости. Далее полученные кривые токов разлагаются в гармонический ряд в соответствии с алгоритмом быстрого преобразования Фурье.

В целях пояснения сказанного ранее о возможности использования модели шестипульсного преобразователя в качестве базовой приведем расчетную

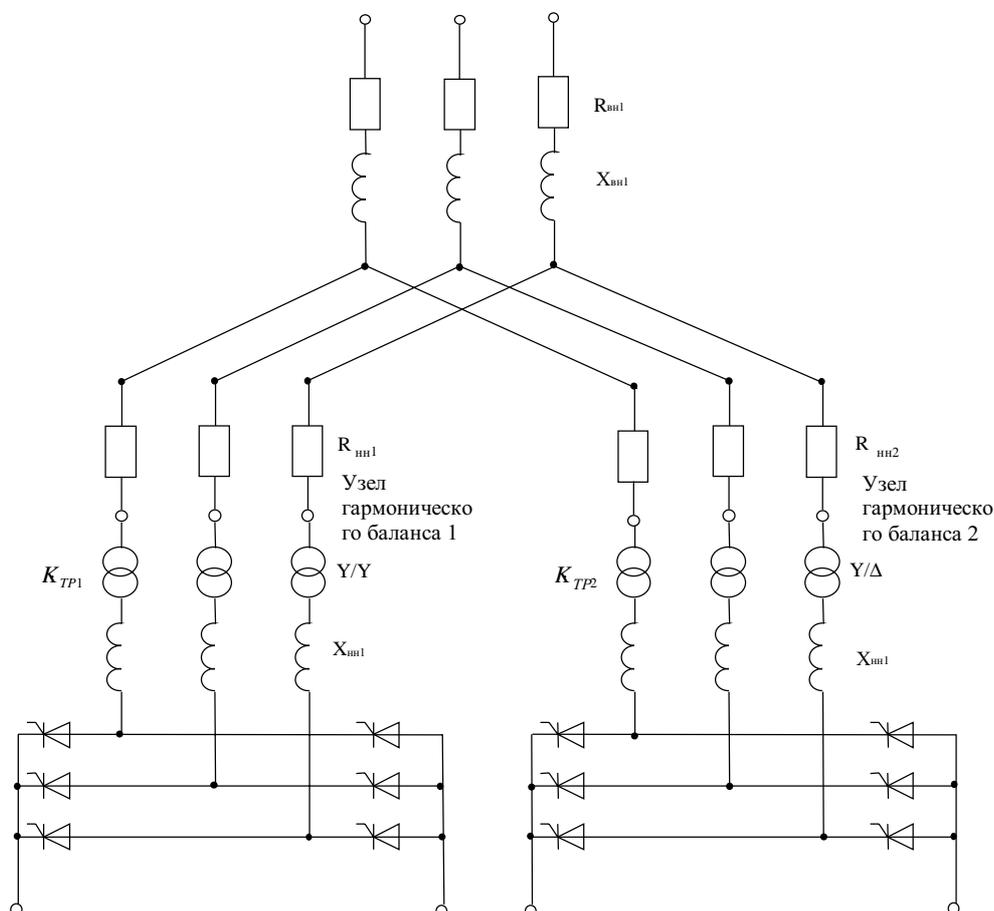


Рис. 4. Расчетная схема двенадцатипульсного преобразователя.

схему 12-пульсного преобразователя, подключенного через трансформатор с расщепленной обмоткой низкого напряжения (рис. 4). В этом случае используются две базовые математические модели преобразователя, в одной из которых комплексный коэффициент трансформации \dot{K}_{TP1} отвечает схеме соединения обмоток Y/Y, а в другой, комплексный коэффициент трансформации \dot{K}_{TP2} отвечает схеме соединения Y/ Δ -11. Сопротивления $X_{\text{нн1}}$ и $X_{\text{нн2}}$ являются сопротивлениями нижних плечей трехлучевой схемы замещения преобразовательного трансформатора, $R_{\text{нн1}}$ и $R_{\text{нн2}}$ - активные сопротивления соответствующих плечей трансформаторов. Гармонический баланс в этом случае ведется в двух узлах - 1 и 2.

Моделирование нелинейного и несимметричного шунта намагничивания трансформатора. Шунты намагничивания понижающих трансформаторов, как и преобразовательная нагрузка, являются значительным источником высших гармоник, которым, как правило, при проведении расчетов пренебрегают, ввиду якобы небольшой величины привносимых им гармонических искажений. Однако, как показано в [12], высшие гармоники намагничивающих токов могут оказывать существенное влияние на уровень несинусоидальности напряжения в сети (особенно, при повышении уровня напряжения на зажимах трансформатора выше номинального). Причем, вследствие принципиальной несимметрии магнитопровода трансформатора и возникающей по этой причине пофазной несимметрии токов намагничивания, в их составе присутствуют все нечетные гармоники, в том числе и кратные трем как составляющие прямой и обратной последовательности. Особенно велико влияние намагничивающих токов трансформаторов 6-10/0.4кВ в распределительных сетях, где их суммарная мощность может быть соизмерима с мощностью сетевого трансформатора.

Построение математической модели трехфазного несимметричного шунта намагничивания трансформатора с произвольной схемой соединения обмоток проводилось авторами на основании методики расчета высших гармоник в токах намагничивания, изложенной в [12]. В качестве базовой была принята модель однофазного стержня трансформатора. При этом обеспечивается однозначная зависимость между намагничивающей силой стержня и напряжением.

Согласно разработанной методике на каждой итерации расчета режима электрической сети вычисляются намагничивающие токи трансформаторов. Алгоритм их определения можно условно разделить на два этапа: на первом, на основании расчета однофазного стержня трансформатора, определяются намагничивающие силы в каждом из его стержней; на втором, с помощью совместного решения уравнений магнитной и электрической цепей определяются искоемые фазные либо линейные (зависит от схемы соединения обмоток трансформатора) намагничивающие токи, генерируемые трансформатором во внешнюю сеть.

Алгоритм определения спектра намагничивающих сил по заданному напряжению в точке подключения шунта состоит в следующем. Сначала, по заданному значению спектра приложенного к шунту напряжения определяются

спектр и форма временной кривой магнитного потока в стержне трансформатора $\sum \dot{\Phi}_v$ и $\Phi(I)$. Далее, с помощью нелинейной кривой намагничивания трансформатора однозначно определяются кривая $f(I)$ и спектр $\sum \dot{f}_v$ намагничивающей силы стержня. Описанный выше алгоритм можно свести к следующей последовательности вычислений:

$$\sum \dot{\Phi}_v \rightarrow \sum \dot{\Phi}_v \rightarrow \Phi(I) \rightarrow f(I) \rightarrow \sum \dot{f}_v. \quad (6)$$

С помощью найденных таким образом намагничивающих сил каждого из стержней трансформатора $\sum \dot{f}_{(A,B,C)v}$ определяются намагничивающие токи в фазах трансформатора $\sum \dot{i}_{(A,B,C)v}$ [12]:

а) первичная обмотка трансформатора соединена в Y:

$$\dot{i}_{Av} = \frac{2\dot{f}_{Av} - \dot{f}_{Bv} - \dot{f}_{Cv}}{3W}; \quad \dot{i}_{Bv} = \frac{2\dot{f}_{Bv} - \dot{f}_{Av} - \dot{f}_{Cv}}{3W}; \quad \dot{i}_{Cv} = \frac{2\dot{f}_{Cv} - \dot{f}_{Bv} - \dot{f}_{Av}}{3W}; \quad (7)$$

б) первичная обмотка трансформатора соединена в Δ :

$$\dot{i}_{Av} = \frac{\dot{f}_{Bv} - \dot{f}_{Av}}{W}; \quad \dot{i}_{Bv} = \frac{\dot{f}_{Cv} - \dot{f}_{Bv}}{W}; \quad \dot{i}_{Cv} = \frac{\dot{f}_{Av} - \dot{f}_{Cv}}{W}; \quad (8)$$

где W - число витков обмоток трансформатора.

Полученные спектры намагничивающих токов трехфазных несимметричных понижающих трансформаторов являются окончательным итогом расчета нелинейных шунтов намагничивания и используются на каждой итерации процесса расчета несинусоидального режима сети в качестве задающих токов.

Моделирование других элементов электроэнергетических систем.

а) *Моделирование сетевых трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов.* Трехфазные и, в общем случае, многообмоточные сетевые трансформаторы и автотрансформаторы с произвольной схемой соединения обмоток, при условии выноса нелинейных шунтов намагничивания на внешние зажимы, представляются линейной схемой замещения. Матрица узловых проводимостей такой схемы определяется методом линейного преобразования [13], для этого формируется простейшая сетевая матрица проводимостей трансформатора $Y_{пр}$, определяющая отношение входных узловых токов к узловым напряжениям схемы замещения трансформатора. Также формируется матрица соединений C , с помощью которой соотносятся узловые напряжения внешней сети с узловыми напряжениями схемы замещения трансформатора. На основе полученных матриц $Y_{пр}$ и C на каждой из учитываемых гармоник формируется матрица узловых проводимостей Y_y исходной сети, включаемая в общую узловую матрицу проводимостей рассчитываемой электрической сети: $Y_y = C^T Y_{пр} C$.

б) *Учет многопроводных линий электропередачи.* Трехфазные кабельные линии и относительно короткие воздушные линии 6-10-35кВ вполне допустимо учитывать обычными П-схемами замещения с сосредоточенными параметрами. Однако исследования, например [11,13], показывают на целесообразность учета волновых процессов в воздушных линиях 220кВ и выше при их длине более 100км. При разработке алгоритма расчета таких линий использовалась

эквивалентная П-образная схема замещения, получаемая при решении линейных дифференциальных уравнений, описывающих распространение волны вдоль воздушной линии. Записанное в матричной форме решение имеет вид :

$$\begin{bmatrix} I_H \\ I_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -B & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_H \\ U_K \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $A = Z^{-1} \cdot \gamma \cdot (cth(\gamma l))$, $B = Z^{-1} \cdot \gamma \cdot (sh(\gamma l))^{-1}$, U_H, I_K, U_K, I_H - векторы напряжений и токов в начале и конце многопроводной линии, соответственно, l - длина линии, Z - матрица сопротивлений линии, γ - матрица коэффициентов распространения.

Основная проблема при определении матриц A и B состоит в необходимости численной оценки гиперболических функций коэффициента распространения, имеющего матричный вид: $\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$.

Поскольку не существует прямого способа вычисления гиперболических синусов и тангенсов, входящих в выражения для A и B , то авторами был разработан метод диагонализации матриц Z и γ , применительно к случаям трехфазных линий с симметрией относительно средней фазы геометрического расположения проводов. Принятое ограничение не является существенным для анализа процессов распространения высших гармоник, и, к тому же, широко используется на практике. На основе получаемых таким образом диагональных матриц формируются матрица A и B , с использованием которой получаем полную эквивалентную матрицу проводимостей $Y_{\text{экв}}$ многопроводной линии с учетом распределенности ее параметров:

$$Y_{\text{экв}} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -B & A \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Вследствие использования частотного метода для расчета несинусоидального установившегося режима электрической сети формирование матрицы $Y_{\text{экв}}$ производится на каждой из учитываемых гармоник с последующим включением ее в общую матрицу узловых проводимостей рассчитываемой электрической сети.

Алгоритм расчета частотных характеристик сети. Применение в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой средств компенсации реактивной мощности, имеющих в своем составе емкостные элементы, а также наличие в схемах большой естественной емкости оборудования, шин, кабелей, ЛЭП оказывает значительное влияние на режимы работы силового оборудования, которое наиболее сильно проявляется при резонансных явлениях. Изучить свойства систем электроснабжения, в частности оценить предполагаемые резонансные частоты, помогают частотные характеристики (ЧХ), показывающие амплитудно-фазовые зависимости входных сопротивлений относительно любых трехфазных узлов линейной части сети от частоты.

Входные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей $Z_{\text{ф}}^{(1,2,0)}$ i -го трехфазного узла определяются напряжением соответствующей

последовательности в данном узле, возникающем при подключении к нему задающего единичного тока прямой, обратной либо нулевой последовательности $\dot{i}_{i\nu}^{(q,2,0)}$ соответствующей гармоники ν :

$$Z_{\dot{A}\dot{I}\nu}^{(q,2,0)} = \frac{\dot{V}_{i\nu}^{(q,2,0)}}{\dot{i}_{i\nu}^{(q,2,0)} = \dot{I}}, \quad (11)$$

где $\dot{V}_{i\nu}^{(q,2,0)}$ определяются в результате решения линейной системы уравнений внешней электрической сети при последующем разложении на симметричные составляющие. Аналогично можно рассчитывать частотные зависимости взаимных сопротивлений $Z_{i\psi}^{(q,2,0)}$.

Интересующий частотный диапазон и шаг изменения по частоте $\Delta\nu$ выбираются исходя из конкретных условий задачи. Предусмотрена возможность варьирования основной частоты, что принципиально важно учитывать при проектировании надежных технических решений.

Помимо трехфазных задающих токов симметричных составляющих имеется возможность определения реакции системы на гармонические возмущения с произвольной несимметрией токов. Важным практическим применением является, в частности, использование однофазного источника гармоник для определения частотных свойств контуров однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, в которых, как известно [14], могут возникать опасные резонансные процессы.

Примеры использования программного комплекса ГАММА. Разработанный авторами программный комплекс ГАММА позволяет создавать математические модели конкретных систем электроснабжения (СЭС) с нелинейными нагрузками для проведения исследований и оптимизации несинусоидальных и несимметричных квазиустановившихся режимов. Это, в первую очередь, относится к СЭС промышленного назначения, в которых традиционно применяется компенсация реактивной мощности и, следовательно, высока вероятность возникновения резонансных процессов на высших гармониках. В большинстве случаев достаточно использования версии программы, предполагающей симметричную постановку задачи. Однако можно выделить широкий круг актуальных задач, требующих анализа несинусоидальных и несимметричных режимов: процессы при однофазном замыкании на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью [14], влияние на показатели качества электроэнергии несимметрии питающего напряжения, несимметрии параметров электрической сети в ряде аварийных и ремонтных режимов, несимметрии параметров линейных и нелинейных нагрузок. Примером несимметричных нелинейных нагрузок являются шунты намагничивания понижающих трансформаторов, имеющих в подавляющем большинстве несимметричный магнитопровод [12], преобразователи с несимметричным по фазам управлением вследствие различного рода нарушений.

Целью оптимизации режимов обычно является минимизация уровней гармонических искажений напряжения и снижение добавочных потерь мощности

за счет коррекции конфигурации и параметров схем СЭС, выбора компенсирующих и фильтро-компенсирующих устройств и требований к диапазонам изменения их параметров в различных расчетных режимах (нормальных, послеаварийных, ремонтных и т.д.). Быстрота расчета, удобство изменения параметров электрической сети и их частотных зависимостей в программном комплексе ГАММА позволяют проводить многовариантные расчеты с варьированием возможных параметров схемы и частоты питающего напряжения. Возможность оперативного просмотра ЧХ сети значительно облегчает стратегию принятия целесообразных технических решений.

Примером одной из наиболее сложных решавшихся авторами задач по оптимизации несинусоидального режима являлись расчеты режимов работы СЭС сверхмощного нагрузочного узла с установленной мощностью управляемых 12-пульсных преобразователей порядка 1200 МВт, предназначенного для управления сверхпроводящими катушками экспериментального термоядерного элемента по международному проекту ИТЭР [15]. В этом случае моделировалась СЭС с двумя линиями глубокого ввода на напряжении 400 кВ, четыре секции сборных шин 72 кВ, от которых питались преобразовательные трансформаторы (общее число учитываемых преобразователей доходило до 47) и фильтро-компенсирующие устройства (ФКУ) суммарной мощностью 640 МВА, состоящие из резонансных фильтров и ступенчато регулируемых КБ. Формулировались технические требования к параметрам ФКУ и законам их управления с учетом возможных изменений конфигурации схемы при аварийных нарушениях в СЭС, при работе АВР секций шин, при аварийных перегрузках оборудования и изменениях частоты, при отказах в управлении преобразователей, в том числе и при нарушениях 12-пульсных режимов их работы.

Программный комплекс ГАММА оказался весьма эффективным при исследовании резонансных явлений, возникающих в несимметричных режимах однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в электрических сетях с изолированной нейтралью. Были проведены расчеты по определению возможных частот свободных колебаний контура ОЗЗ и уровней высших гармоник в токе замыкания и в фазных и линейных напряжениях применительно к СЭС одного из крупных нефтеперерабатывающих заводов с расчетным емкостным током около 500 А [14]. Практически единственным источником гармонических возмущений здесь являлись токи намагничивания понижающих трансформаторов 6/0.4 кВ, суммарная мощность которых составляет 160 МВА, но аварийные осциллографы, тем не менее, фиксировали при ОЗЗ гармонические искажения фазных напряжений с преобладанием 5 или 9 резонирующих гармоник (в зависимости от места повреждения), достигающих значений, соизмеримых с величиной напряжения основной частоты. Моделирование в трехфазной постановке СЭС с учетом всей совокупности имеющихся генераторов, трансформаторов, сдвоенных и одинарных реакторов, а также трансформаторов с несимметричным магнитопроводом как источников гармонических возмущений позволило выявить закономерности возникновения опасных резонансных усилений токов ОЗЗ и предложить ряд оптимизационных мероприятий.

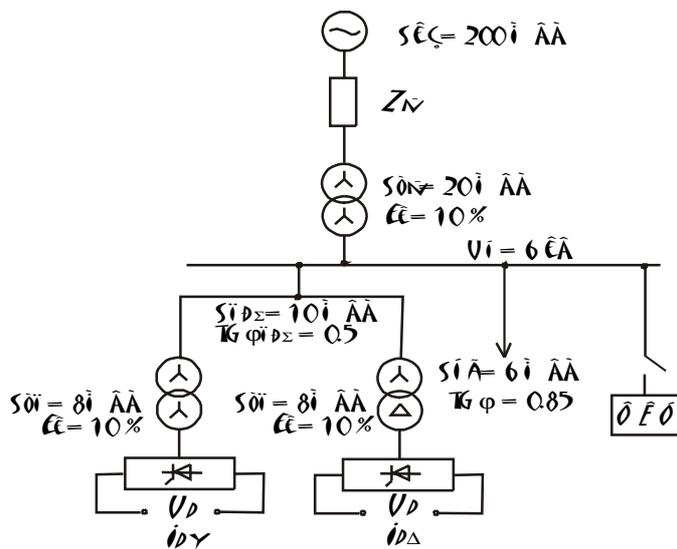


Рис. 5. Схема простейшей СЭ с преобразовательной нагрузкой.

Возможную последовательность проведения анализа несинусоидального режима с применением программного комплекса «ГАММА» продемонстрируем применительно к относительно простой СЭС, изображенной на рис.5. Мощность преобразовательной нагрузки (12-пульсный режим при $I_{d\gamma} = I_{d\Delta}$) составляет около 50% от мощности сетевого трансформатора. Преобразователь управляется по мощности и работает с углом управления $\alpha = 25^\circ$, потребляя реактивную мощность порядка 4 МВАр. При отсутствии компенсирующих устройств (КУ) коэффициент искажения синусоидальности напряжения составляет 8%, что превышает допустимое значение, требуется принятие мер по его уменьшению. Кроме того, необходима компенсация реактивной мощности, поскольку ее результирующее потребление на шинах 6кВ составляет 7.6 МВАр ($\text{tg}(\varphi_{\Sigma}) \cong 0.6$).

Если, например, КУ выполнить в виде ФКУ, состоящего из двух резонансных фильтров, настроенных на 11 и 13 гармоники с суммарной реактивной мощностью 2.5 МВА, то при приемлемом $\text{tg}(\varphi_{\Sigma}) \cong 0.37$ коэффициент искажения синусоидальности напряжения снижается до $K_U = 0.5\%$ при допустимой нагрузке фильтров высшими гармониками. Однако расчеты амплитудных и фазовых ЧХ входного сопротивления сети для этого случая (рис.6) свидетельствуют

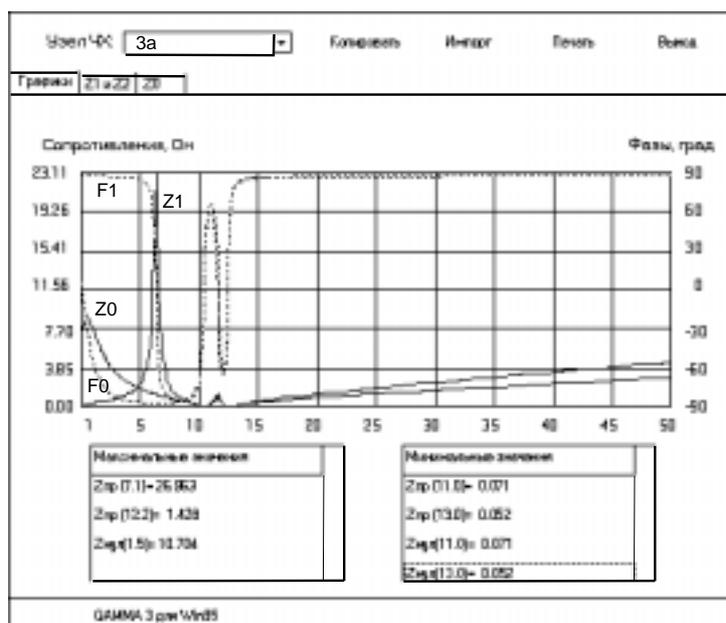
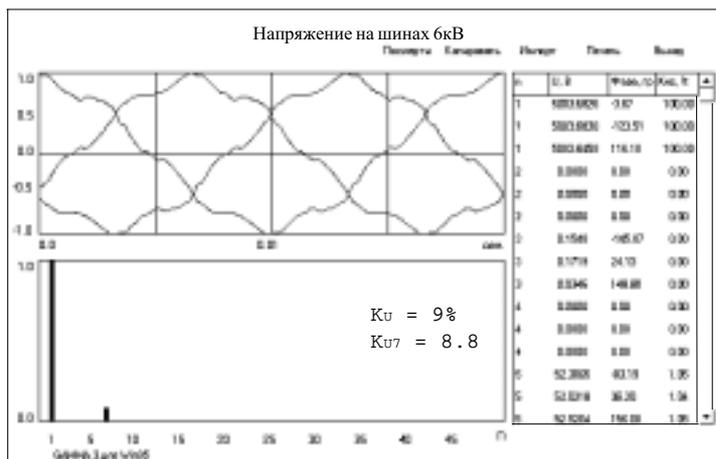


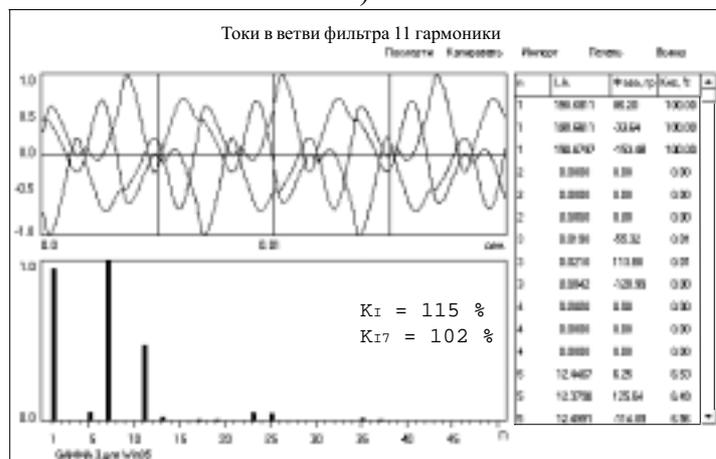
Рис. 6. ЧХ входного сопротивления сети при установке фильтров 11 и 13 гармоник..

о наличии резонансной частоты на 7 гармонике, которая в нормальном режиме в СЭС отсутствует, но может появиться и значительно усилиться в случае разбалансировки в работе 12-пульсного преобразователя. На рис.7 приведены расчеты спектров фазных токов и напряжений и их временные зависимости при отклонении токов мостов на 25%. Отчетливо видно резкое усиление напряжения 7 гармоники ($K_U \cong 9\%$, $K_{U7} = 8.8\%$). Этой гармоникой также перегружены резонансные фильтры: ток 7 гармоники превышает ток первой гармони-

ки.



а)



б)

Рис. 7. Графики и спектры напряжений (а) и токов (б) в фильтре 11 гармоники при разбалансировке выпрямленных токов мостов преобразователя при установке фильтров 11 и 13 гармоник.

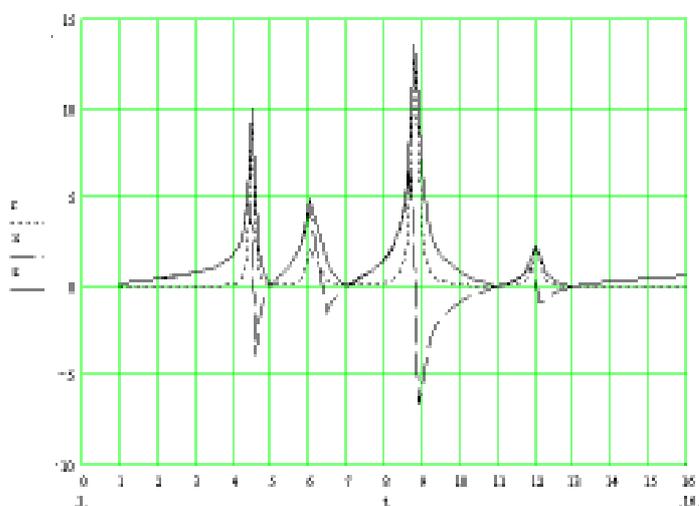


Рис. 8. ЧХ входного сопротивления сети при установке фильтров 5, 7, 11 и 13 гармоник.

ки (см. токи фильтра 11 гармоники на рис.7б), что свидетельствует о возникновении резонансного процесса в контуре питающая сеть - ФКУ.

Устранить резонансные явления на 7 гармонике можно путем установки дополнительных фильтров 5 и 7 гармоник. Но при неудачном выборе их параметров могут возникнуть другие опасные полюса ЧХ. Так, при мощности каждого из фильтров 5 и 7 гармоник, равной 1МВА возникает полюс ЧХ на неканонической 9 гармонике (рис.8). Обычно на этот факт не обращают внимания, считая, что в практике эксплуатации гармонические возмущения на этой частоте, тем более в сети с изолированной нейтралью, отсутствуют. Однако, возмущающая гармоника этой частоты возникает в токе преобразователя как составляющая прямой и обратной последовательностей при относительно небольшой несимметрии линейных питающих напряжений, находящейся в пределах допустимых по стандарту значений.

Например, на рис.9 и 10 приведены фрагменты расчета установившегося несинусоидального режима при величине коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности в напряжении питающей энергосистемы $K_{2U} = 3.4\%$. При этом в спектре тока преобразователя появляется несимметрия гармоник фазных токов и неканонические гармони-

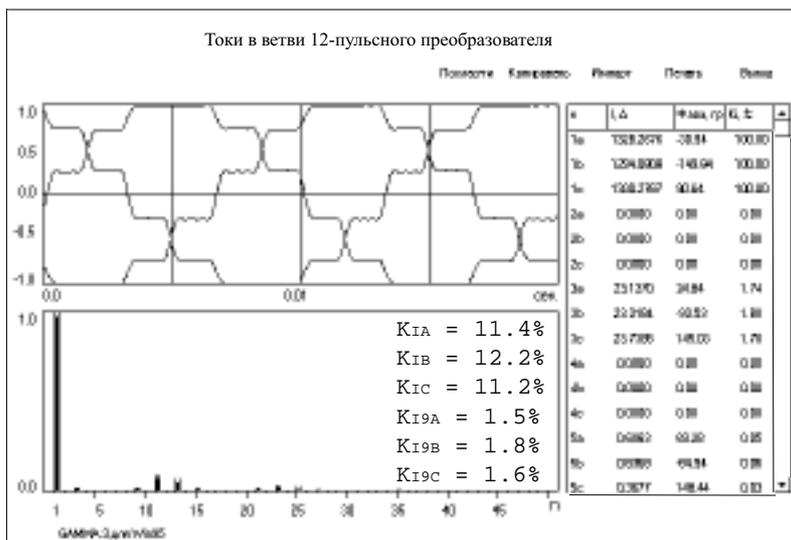
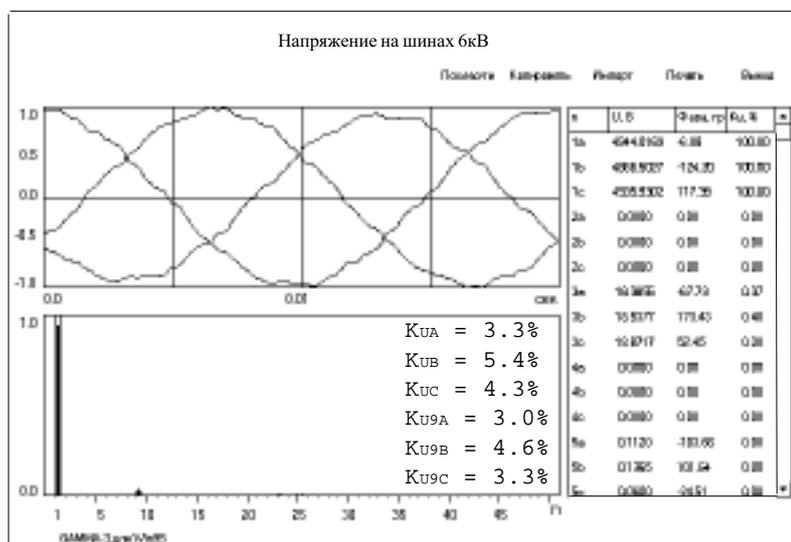
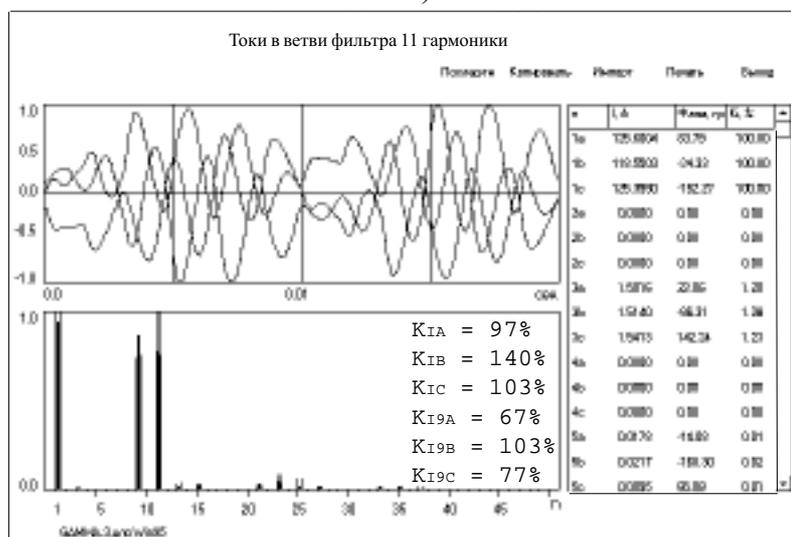


Рис.9. Графики и спектры токов преобразователя при несимметрии питающего напряжения ($K_{2U}=3.4\%$)



а)



б)

Рис.10. Графики и спектры напряжений (а) и токов (б) фильтра 11 гармоники для случая несимметрии питающего напряжения.

ки порядков 3, 5, 7, 9 и т.д., причем интересующая нас 9 гармоника в фазах А, В, С составляет соответственно 1.5, 1.8 и 1.6 % от первой (рис.9). Коэффициент искажения синусоидальности линейных напряжений на шинах 6кВ резко увеличиваются за счет усиления 9 гармоники и в самой неблагоприятной фазе достигает 5% (рис.10а). Начинают недопустимо перегружаться фильтры 11 и 13 гармоник - см. рис.10б с показом кривых и спектров тока в фильтре 11 гармоники.

Выводы.

1. На базе метода гармонического баланса разработан и программно реализован алгоритм расчета установившегося несинусоидального и, в общем случае, несимметричного по фазам режима, при строгой привязке векторов возмущающих токов высших гармоник, инициированных нелинейными элементами, к соответствующим векторам основной частоты.

2. Как неотъемлемая часть единого алгоритма разработан рациональный метод численного решения нелинейных уравнений, описываю-

щих установившийся режим работы наиболее распространенных нелинейных элементов СЭС (управляемых преобразователей различной конфигурации и шунтов намагничивания трансформаторов), позволяющий надежно определять их режимные параметры при произвольном искажении питающего напряжения.

Реализованы трехфазные схемы замещения основных элементов электрических сетей, учитывающие частотные зависимости активных и реактивных сопротивлений, а также специфику прохождения высших гармоник через трансформаторы с произвольной схемой соединения обмоток, линии электропередачи с несимметричными, в общем случае, параметрами и эквивалентные нагрузочные узлы.

3. Разработанный программный комплекс содержит эффективный алгоритм расчета ЧХ при произвольных местах приложения симметричных или несимметричных задающих гармонических возмущений.

4. Приведенные примеры использования разработанных алгоритмов и программ при решении практических задач по обеспечению качества электроэнергии свидетельствуют об их высокой эффективности и о перспективности дальнейшего развития алгоритмов, базирующихся на использовании метода гармонического баланса для учета взаимовлияния нелинейных элементов и электрической сети.

Литература:

1. Коротков Б.А., Попков Е.Н. Алгоритмы имитационного моделирования переходных процессов в электрических системах: Учебное пособие / Под. ред. Груздева И.А. - Л.: ЛГУ, 1987. -280с.

2. Коровкин Н.В., Умнова М.О. Методика моделирования переходных процессов в элементах электромеханических и электроэнергетических устройств с эквивалентными параметрами зависящими от частоты // Проблемы развития электроэнергетических систем. - Санкт-Петербург, 1992. с. 49-53.

3. N.V.Korovkin, L.A.Kuchumov, T.G.Minevich, A.S.Novitskiy, E.E.Selina. The analysis of harmonics in nonlinear electric power networks including the elements with frequency dependent parameters. Proc. of the Int. Symposium on EMC, September 1998, Rome, Italy, vol.1, pp.96-99.

4. Черепанов В.В. Расчеты несинусоидальных и несимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий: Учебное пособие. - Горький: изд. ГТУ, 1989. -88с.

5. Андреев В.А., Сказываева Н.С. Метод расчета на ЭВМ установившихся режимов энергосистем // Тр. НИИПТ. Л.: Энергоатомиздат ЛО, 1980 с.3-8.

6. Андреев В.А. Метод расчета статических характеристик электропередачи постоянного тока с учетом сложной структуры примыкающей энергосистемы // Изв. НИИПТ, вып.16, 1969.

7. Левченко В.В. Расчет установившихся режимов в системах переменного тока сложной структуры, содержащих мощные преобразователи // Преобразовательные устройства и системы возбуждения синхронных машин. - Л.: Наука, Ленингр. отделение, 1973. с. 80-89.

8. Глухивский Л.И. Расчет периодических процессов электротехнических устройств (дифференциальный гармонический метод) - Львов: Вище. шк. - Изд-во при Львов. университете, 1984. - 164с.

9. Харлов Н.Н. Методика совместного расчета установившихся режимов систем электроснабжения и преобразователей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Киев, 1985. -16с.

10. Картасиди Н.Ю. Разработка алгоритмов расчета несинусоидального режима при учете взаимовлияния нелинейной нагрузки и электрической сети по методу гармонического баланса: Автореф. дис. ... кад. техн. наук. - Санкт-Петербург, 1993. - 16с.

11. Пахомов А.В. Разработка алгоритмов расчета и исследование несимметричных несинусоидальных режимов электрических систем с преобразовательной нагрузкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Санкт-Петербург, 1993. - 16с.

12. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А. Методика Расчета высших гармонических в токах намагничивания понижающих трансформаторов. - «Электричество», №3, 1998.

13. Аррилага Дж., Бредли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. -320с.

14. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А. Резонансные явления в кабельных электрических сетях городов и промышленных предприятий при однофазных замыканиях на землю. Материалы Всероссийской научно-техн. конф. «Городские электрические сети в современных условиях». РНТОЭ, Санкт-Петербург, 1998г. с.70-74.

15. Coil Power Supply and Distribution System Design. ITER. Final Report. RF Home Team, N41TD06FR(D318), 1997.

Приложение

Идея построения математической модели преобразователя для расчета несимметричных и несинусоидальных режимов:

1. Уравнения, записанные с учетом непрерывности выпрямленного тока и условий коммутации вентилях в моменты их включения и выключения:

$$\begin{aligned} i'_{d1}(\alpha_1) - i''_{d3}(\alpha_1 + \pi) &= 0, & i_3(\alpha_1) &= 0, \\ i'_{d1}(\gamma_1) - i''_{d3}(\gamma_1) &= 0, & i_1(\gamma_1) &= 0, \\ i'_{d2}(\alpha_2) - i''_{d1}(\alpha_2) &= 0, & i_4(\alpha_2) &= 0, \\ i'_{d2}(\gamma_2) - i''_{d2}(\gamma_2) &= 0, & i_2(\gamma_2) &= 0, \\ i'_{d3}(\alpha_3) - i''_{d2}(\alpha_3) &= 0, & i_5(\alpha_3) &= 0, \\ i'_{d3}(\gamma_3) - i''_{d3}(\gamma_3) &= 0, & i_3(\gamma_3) &= 0, \end{aligned}$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – моменты включения трех вентилях на рассматриваемом интервале повторяемости 180 электрических градусов; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – моменты выключения вентилях; у токов индекс (l) соответствует коммутационному интервалу, а индекс (l') – межкоммутационному.

2. Уравнение, определяющее среднее значение выпрямленного тока на всем рассматриваемом интервале повторяемости:

$$\pi I_d - \int_{\alpha_1}^{\gamma_1} i'_{d1}(\theta) d\theta - \int_{\gamma_1}^{\alpha_2} i''_{d1}(\theta) d\theta - \int_{\alpha_2}^{\gamma_2} i'_{d2}(\theta) d\theta - \int_{\gamma_2}^{\alpha_3} i''_{d2}(\theta) d\theta - \int_{\alpha_3}^{\gamma_3} i'_{d3}(\theta) d\theta - \int_{\gamma_3}^{\alpha_1 + \pi} i''_{d3}(\theta) d\theta = 0$$

данное уравнение используется для определения 9 постоянных интегрирования ($A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{31}, A_{32}, A_{33}$).

3. Соотношения, отражающие необходимые условия включения и выключения вентилях с учетом падения напряжения в учитываемой индуктивности L_t (положительный знак напряжения на вентиле, вступающем в работу и отрицательный знак восстанавливающегося напряжения на вентиле, выходящем из работы):

$$\begin{aligned} U_3(\alpha_1) - V_{11} &= 0, & U_1(\gamma_1) + V_{21} &= 0, \\ U_4(\alpha_2) - V_{12} &= 0, & U_2(\gamma_2) + V_{22} &= 0, \\ U_5(\alpha_3) - V_{13} &= 0, & U_3(\gamma_3) + V_{23} &= 0, \end{aligned}$$

где V – искусственные положительные переменные, используемые с целью обращения неравенства в равенство. Выполнение условия $V_1 > 0$ при задании момента α свидетельствует о возможности существования данного режима управляемого преобразователя; при задании $V_1 = 0$ воспроизводится режим неуправляемого преобразователя и определяется момент естественного зажигания вентиля α . При $V_2 > 0$ гарантируется окончание коммутации вентиля преобразователя, работающего в режиме инвертора, а при задании $V_2 = 0$ находится момент времени окончания коммутации в предельно допустимом режиме для инвертора, когда угол погасания δ равен нулю.

4. Уравнение, связывающее средние значения выпрямленного тока I_d и выпрямленного напряжения U_d :

$$U_d = I_d R_d + E_d.$$