

Министерство высшего и среднего специального
образования БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Аспирант В.А.Царегородцев

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С МОЩНЫМИ
ВЕНТИЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ

(05.275 Электрические сети и системы)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

М и н о к 1 9 7 1

Работа выполнена на кафедре "Электрические системы и сети" Белорусского ордена Трудового Красного знамени политехнического института

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Г.Е.ПОСПЕЛОВ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
В.К.ПЛЮГАЧЕВ
кандидат технических наук, доцент
В.И.БОЧАРОВ

Ведущее предприятие - Главное производственное управление по энергетике и электрификации Белорусской ССР - Белглавэнерго.

Автореферат разослан "16" октября 1971 г.

Защита состоится "26" ноября 1971 г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Заверенный и скрепленный печатью отзыв на автореферат в 2-х экземплярах просим направлять по адресу:

г. Минск-27, Ленинский проспект, 65,
Белорусский политехнический институт,
Ученому секретарю Совета

О дне защиты будет объявлено в газете "Вечерний Минск".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

Ученый секретарь Совета -
кандидат технических наук, доцент

Л.Л.ЧЕРВИНСКИЙ

Решения XXIV съезда КПСС и девятый пятилетний план развития народного хозяйства СССР предусматривают повышение требований к качеству продукции промышленных предприятий, что в полной мере относится и к энергетическим системам. Качество электрической энергии оказывает заметное влияние на технологические и производственные процессы во многих отраслях народного хозяйства.

Качество электрической энергии регламентируется ГОСТом и характеризуется несколькими показателями, в частности, несинусоидальностью формы кривой напряжения и наличием высших гармоник в электрической сети переменного тока.

Искажение формы кривой напряжения вызывается работой в энергетических системах вентильно-преобразовательных установок. Такие установки имеются в системах электроснабжения промышленных предприятий, потребляющих электроэнергию на постоянном токе, — цветная и черная металлургия, химические производства и др. Вентильно-преобразовательные установки большой мощности получают распространение в самих энергетических системах в связи со строительством в них электропередач постоянного тока.

В процессе своей работы вентили этих установок генерируют высшие гармонические токи и напряжения в электрическую систему переменного тока и искажают форму кривой напряжения в ней. Величины высших гармоник и несинусоидальности формы кривой напряжения определяются соотношением мощностей энергетической системы и вентильно-преобразовательной установки.

В большинстве энергетических систем данному показателю качества электрической энергии и вопросам влияния высших гармоник на различные элементы систем не уделяется должного внимания, хотя в отдельных энергосистемах работники эксплуатации уже столкнулись с необходимостью улучшения качества электрической энергии вследствие наличия высших гармоник.

Для того, чтобы определить, как влияют высшие гармоники на технико-экономические показатели энергетических систем и

выявить техническую и экономическую необходимость их устранения, необходимо произвести расчет гармоник в сложной сети современных энергосистем и определить ущерб от высших гармоник.

Целью реферлируемой работы и послужило исследование качества электрической энергии в энергетических системах с мощными вентиляльно-преобразовательными установками, разработка методов расчета высших гармоник в сложно-замкнутых электрических сетях с помощью ЭЦМ и статических моделей электрических систем и методики технико-экономической оценки ущерба от высших гармоник в электрических системах, определение технико-экономических условий применения резонансных фильтров для устранения несинусоидальности формы кривой напряжения в подобных энергосистемах. Результаты работы могут быть использованы проектными и эксплуатационными организациями и уже используются в одной из крупнейших энергетических систем страны. Более подробная характеристика работы дана ниже.

Первая глава посвящена анализу работы вентиляльно-преобразовательной установки; рассмотрению влияния высших гармоник на нормальную работу различных элементов электрических систем; характеристике мероприятий, устраняющих несинусоидальность формы кривых токов и напряжений в основных электрических сетях энергетических систем.

В главе дана методика производства экспериментальных измерений высших гармонических тока и напряжения и анализ результатов таких измерений в одной из крупнейших энергетических систем страны, проведенных под руководством автора.

Известно, что вентили преобразовательных установок генерируют в электрическую сеть переменного тока нечетные высшие гармоники прямой и обратной последовательностей, порядки которых равны:

$$j = m \cdot k \pm 1, \quad (1)$$

где m - число фаз выпрямления вентиляльно-преобразовательной установки;

k - 1, 2, 3, ..., числа натурального ряда.

Действующее значение j -той гармоники тока в кривой

первичного тока преобразовательного трансформатора без учета явления коммутации вентилей равно:

$$I_{110} = \frac{m}{3k_{TP}} \cdot \frac{1}{\nu} \cdot I_d \cdot \sin \frac{\pi \nu}{m}, \quad (2)$$

где I_d - значение выпрямленного тока;

k_{TP} - коэффициент трансформации преобразовательного трансформатора.

Значения гармоник напряжения зависят от мощности установки и величины индуктивного сопротивления сети переменного тока, приведенной к шинам генератора гармоник.

Вследствие того, что при мощности вентильно-преобразовательной установки, соизмеримой с мощностью энергетической системы, индуктивное сопротивление всей сети переменного тока может быть большим, происходит искажение формы кривой напряжения практически во всей электрической сети, а величины высших гармоник значительно превышают допустимое по ГОСТ 13109-67 значение.

В работе проанализированы эксплуатационные наблюдения и рассмотрены факты отрицательного воздействия высших гармоник на различные элементы энергетических систем - случаи резкого повышения вибрации и нагрева генераторов электростанций, повреждения конденсаторных батарей. Данные эксплуатационных наблюдений свидетельствуют о том, что наличие высших гармоник в электрических системах представляет собой нежелательное явление, так как приводит к дополнительным потерям мощности и энергии, нагреву отдельных элементов электрооборудования и ускорению процесса старения изоляции, ложной работе устройств релейной защиты и автоматики, появлению помех телефонному приему и т.п. Особую опасность для оборудования, особенно для батарей статических конденсаторов, представляют резонансные явления на частоте какой-либо высшей гармоники в электрической сети.

Экспериментальные измерения необходимо производить для того, чтобы определить величины высших гармоник и характер их распределения по электрической сети, оценить правильность расчетов высших гармоник. Для измерений используются анализаторы спектра частотных характеристик АСЧХ, на экране которых можно

наблюдать и фиксировать в виде спектрограмм амплитудные значения гармоник тока или напряжения в широком диапазоне, получаемые при разложении исследуемой кривой. Анализатор подключается к имеющимся на подстанциях электрической сети трансформаторам тока и напряжения измерительных цепей и цепей релейной защиты. На рис. I показана спектрограмма кривой напряжения.

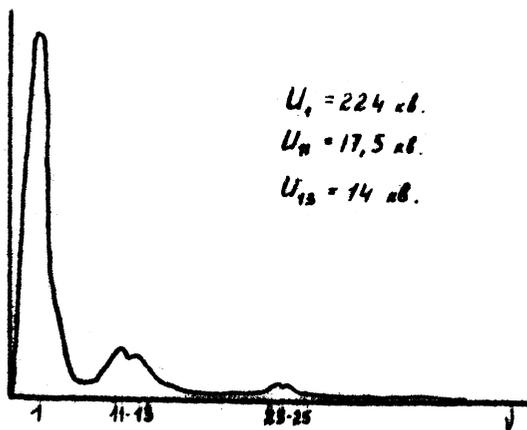


Рис. I. Спектрограмма кривой напряжения на системе шин 220 кв.

Из анализа результатов измерений, произведенных под руководством автора, видно, что в энергетических системах с мощными вентиляльно-преобразовательными установками величины высших гармоник в электрической сети достигают 5+12 % от соответствующих величин основной гармоники, а в отдельных режимах — и больших величин. В исследуемой энергетической системе преобладают гармоники II-го и III-го порядков, так как мощные вентиляльно-преобразовательные установки работают по I2-фазной схеме. Отмечено, что результаты измерений не подтверждают выводов некоторых авторов о том, что при I2-фазной схеме выпрямления величины гармоник в сети переменного тока не превышает 2 + 3 %.

В таблице I приведены результаты измерений гармоник в одном из узлов системы.

Таблица I

№ п/п	Диспетчерское наименование присоединен.	Напряжение и токи гармоник в % от амплитуды основной частоты			
		U_n	$U_{1,3}$	I_n	$I_{1,3}$
1.	Шины IIO кв	8	6	-	-
2.	Шины 220 кв	8	6	-	-
3.	АТ - 5	-	-	10	8
4.	АТ - 6	-	-	10	8
5.	Т - 1	-	-	12	10
6.	Т - 3	-	-	12	10
7.	Т - 4	-	-	12	12
8.	ЛЭП А-1 220 кв	-	-	12	10
9.	ЛЭП А-2 220 кв	-	-	12	10
10.	ЛЭП-Полунино 220 в	-	-	13	12

В первой главе дана характеристика различных мероприятий, помогающих устранить несинусоидальность формы кривых напряжений и токов в электрических сетях - увеличение числа фаз выпрямления, усиление демпферных обмоток генераторов, применение резонансных фильтров.

Показано, что наиболее рациональное мероприятие по устранению высших гармоник в энергосистемах с преобразовательными установками большой мощности - установка резонансных фильтров высших гармоник вблизи их источника, так как при этом устраняются гармоники во всей сложной электрической сети, тогда как при применении других мероприятий этого не происходит. К тому же такой фильтр на частоте основной гармоники представляет собой дополнительное компенсирующее устройство.

По мнению автора, при решении вопроса о средствах борьбы с высшими гармониками необходимо исходить из результатов технико-экономического расчета, в котором сравниваются приведенные затраты на эти средства и ущерб от высших гармоник в электрической системе.

В т о р а я глава посвящена разработке методов расчета высших гармоник в сложнo-замкнутых электрических сетях с помощью ЭЦВМ и статических моделей энергетических систем.

Применение метода преобразования сети для расчета гармоник в таких сетях приводит к недопустимым погрешностям.

Результаты исследований автора показали, что основными особенностями расчета высших гармоник в сложнo-замкнутых электрических сетях можно считать необходимость учета волнового характера распространения электромагнитной энергии при эквивалентировании элементов систем в схемах замещения и существенное влияние емкостной проводимости линий на распределение высших гармоник по сети.

Схемы замещения для расчетов высших гармоник составляются для каждой гармоники отдельно. Параметры элементов при их эквивалентировании в схемах замещения определялись по формулам:

для генераторов

$$x_{\nu r} = A \cdot \nu \cdot x_{2r} , \quad (3)$$

где $A = 0,7 + 0,9$ и зависит от типа генератора;

для трансформаторов

$$x_{\nu T} = \frac{\nu \cdot e_n \% \cdot U_n^2}{S_n} ; \quad (4)$$

для линий электропередачи

$$x_{\nu l} = Z_{\nu l} \cdot \sin \alpha_{\nu} \cdot l , \quad (5)$$

$$y_{\nu l} = \frac{1}{Z_{\nu l}} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\nu} \cdot l}{2} \quad (6)$$

При выводе формул (5) и (6) не учитывались активные сопротивления и проводимости, что вполне допустимо, как показали проверочные расчеты. Для высших гармоник активные сопротивления линий увеличивается вследствие поверхностного эффекта, что необходимо учитывать при расчете потерь активной мощности и энергии от высших гармоник, а на распределение гармоник по сети они не оказывают никакого влияния.

Автором показано, что один и тот же элемент сети оказывает различное влияние на распределение гармоник. Например, линии электропередачи, длина которых близка к длине полуволны какой-либо гармоники, имея малое индуктивное сопротивление и большую емкостную проводимость на частоте этой гармоники, оказывают существенное влияние на распределение токов и особенно напряжений данной гармоники в исследуемой электрической сети.

В схемах замещения для расчетов высших гармоник вентильно-преобразовательные установки представляются генераторами гармоник.

Предлагаемый автором алгоритм исследования и расчета высших гармонических тока и напряжения в сложно-замкнутых электрических сетях реализуется при помощи цифровых вычислительных машин или статических моделей электрических систем и, кратко, заключается в следующем:

- в исследуемой энергетической системе выявляются соизмеримые с ней по мощности вентильно-преобразовательные установки, которые принимаются за генераторы гармоник;

- определяются порядки и величины генерируемых в сеть переменного тока высших гармоник;

- на основе нормальной схемы электрической сети системы составляются схемы замещения для основной (первой) и каждой из рассчитываемых гармоник, определяются параметры элементов схем замещения;

- схемы обрабатываются в соответствии с требованиями программы расчета на ЭЦВМ или инструкциями для расчета на статических моделях электрических систем;

- по методике, изложенной в четвертой главе настоящей работы, определяются параметры фильтров высших гармоник;

- на ЭЦВМ или статических моделях производится расчет нормального режима основной частоты;

- аналогично производятся расчеты для каждой гармоники;

- при расчетах на ЭЦВМ по полученным величинам напряжений U_n той гармоники в первом расчете производится корректировка величин нагрузок и зарядных мощностей ДВЦ и расчет производится вновь;

- производятся расчеты при различных изменениях в схеме электрической сети;

- в схемы замещения отдельных гармоник вводятся своими параметрами фильтры гармоник и производятся расчеты при наличии фильтров;

- по результатам расчетов составляются таблицы результирующих значений токов гармоник для каждого элемента сети и напряжений гармоник для всех узлов сети по выражениям;

$$I_{\nu k} = \sqrt{\sum_{i=3}^{\nu} I_{\nu i}^2} ; \quad (8)$$

$$U_{\nu k} = \sqrt{\sum_{i=3}^{\nu} U_{\nu i}^2} . \quad (9)$$

По данному алгоритму были произведены многочисленные расчеты высших гармоник в сложной электрической сети с помощью ЭЦВМ и моделей электрических систем. Результаты расчетов на ЭЦВМ и моделях переменного тока отличаются между собой на 3 + 5 % и в целом совпадают с результатами экспериментальных измерений. Алгоритм предусматривает, что вполне допустимо, и это показано в работе, при расчетах высших гармоник на ЭЦВМ применение программ расчета установившихся режимов электрических систем, основанных на решении уравнений узловых напряжений. При этом несколько ухудшается сходимость итерационного процесса вследствие большого различия - от 0 до 100%, величин напряжений рассчитываемой гармоники в узлах сети. Выяснено, что наиболее рациональным вычислительным средством для производства высших гармоник в сложных электрических сетях являются статические модели переменного тока, в которых итерационный процесс сводится к регулированию напряжения и тока генератора гармоник.

Проведенными автором исследованиями установлено, что проследить расчеты высших гармоник на статических моделях постоянного тока нецелесообразно, так как на них нельзя смоделировать емкостные проводимости линий электропередачи, роль которых для распределения гармоник по сети имеет существенное значение.

Анализ проведенных исследований и расчетов показал, что при мощности вентиляльно-преобразовательной установки $P_{вст} \geq 0,2 P_{суст}$ величины токов и напряжений высших гармоник в электрической сети лежат в среднем в пределах 3 + 12 % от соответствующих значений основной частоты, а в отдельных узлах могут быть и более.

В третьей главе рассматриваются вопросы влияния высших гармонических тока и напряжения на работу различных элементов электрических систем и дается методика технико-экономической оценки ущерба от высших гармоник.

Величина и характер ущерба от высших гармоник зависят от многих факторов и в основном определяются порядками высших гармоник, их значениями, расположением вентильно-преобразовательной установки в электрической системе и др. Ущерб складывается из многих составляющих и оценить его предлагается следующим выражением:

$$Y_{вг} = Y_{\Delta P} + Y_{ЭГ} + Y_{ДВ} + Y_{ТР} + Y_{СК} + Y_{РЗ} + Y_{Тп}, \quad (10)$$

где $Y_{\Delta P}$ - ущерб от увеличения потерь активной мощности и энергии в электрической системе при наличии высших гармоник;

$Y_{ЭГ}$ - ущерб от воздействия высших гармоник на генераторы электрических станций;

$Y_{ДВ}$ - ущерб от воздействия высших гармоник на асинхронные и синхронные двигатели;

$Y_{ТР}$ - ущерб от влияния на трансформаторы;

$Y_{СК}$ - ущерб от воздействия высших гармоник на статические конденсаторы, используемые в качестве компенсирующих устройств и для повышения коэффициента мощности электропотребителей;

$Y_{РЗ}$ - ущерб, причиняемый ложными действиями устройств релейной защиты и автоматики, которые обусловлены высшими гармоническими тока и напряжения;

$Y_{Тп}$ - ущерб, обусловленный появлением помех телефонной связи при несинусоидальной форме кривых напряжений и токов в электрической системе.

Выражение (10) включает в себя практически все виды ущербов, которые несет электрическая система при несинусоидальной форме кривых тока и напряжения. Слагающие ущерба определяются на основе результатов расчета высших гармонических тока и напряжения в нормальной схеме электрической системы.

Автором показано, что одна из важнейших особенностей воздействия вышних гармоник на элементы электрических систем заключается в том, что в изоляции этих элементов постепенно накапливаются количественные изменения, которые однажды переходят в качественные — аварии, выходы из работы оборудования и к значительному народно-хозяйственному ущербу.

В работе рассмотрены составляющие выражения (10) и получены выражения для их определения.

Потери активной мощности и энергии зависят от величины действующего значения тока, протекающего по элементам электрической системы и их активных сопротивлений. При наличии вышних гармоник действующее значение тока и активные сопротивления элементов увеличиваются, что вызывает увеличение потерь активной мощности и энергии.

Дополнительные потери активной мощности представились формулой:

$$\Delta P_{gr} = 3 \cdot \sum_{l=1}^n \left(\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot R_l \right), \quad (11)$$

где I_i — действующее значение тока i -той гармоники в l -том элементе электрической сети системы;

R_l — активное сопротивление l -того элемента сети для i -той гармоники;

$l = 1, 2, 3, \dots, n$ — число элементов электрической сети, по которым протекают токи вышних гармоник.

Ущерб от увеличения потерь активной мощности и энергии в электрической системе при наличии вышних гармоник определенное выражением:

$$Y_{ab} = \Delta P_{gr} \cdot \tau_v \cdot B, \quad (12)$$

где B — стоимость 1 квт.ч. потерянной энергии для рассматриваемой энергетической системы;

τ_v — время потерь активной мощности, определяемое режимом работы вентиляльно-преобразовательных установок.

Величина τ_v зависит от характера и назначения вентиляльно-преобразовательной установки. Показано, что для большинства

мощных вентиляльно-преобразовательных установок промышленных предприятий величину τ_r можно принимать равной 8000+8500 час., для вентиляльно-преобразовательных установок электропередач постоянного тока величина τ_r зависит от графиков нагрузки этих передач.

Невысосоудальность формы кривой и содержание высших гармоник в токе статора генераторов электрических станций могут достигать значительных размеров и зависят от схемы электрической сети и электрической удаленности генераторов от источников высших гармоник.

В диссертации показано, что при наличии высших гармоник в токе статора генератор недогружается по реактивной мощности на величину ΔQ_{r1} , которая определяется по формуле:

$$\Delta Q_{r1} = \sqrt{3} \cdot U_r \cdot I'_1, \quad (13)$$

где U_r - номинальное напряжение генератора;

I'_1 - результирующее значение токов высших гармоник в токе статора генератора,

$$I'_1 = \sqrt{\sum I_i^2}$$

Для поддержания баланса реактивных мощностей и необходимых уровней напряжения в электрической сети энергетической системы мощность компенсирующих устройств в ней необходимо увеличить на величину ΔQ_{r2} . Затраты, которые необходимо при этом произвести, определялись выражением:

$$Z'_r = (p_n + p_k) \cdot K_{103} \cdot \Delta Q_{r2} + \Delta P_{ук} \cdot \Delta Q_{r2} \cdot \tau_r \cdot \rho, \quad (14)$$

где A_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

A_k - отчисления на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание компенсирующей установки, в долях от капитальных вложений;

K_{103} - стоимость 1 квар мощности компенсирующей установки, руб/квар;

$\Delta P_{ук}$ - удельные потери активной мощности в компенсирующей установке, квт/квар;

τ_r - время потерь для компенсирующей установки, определяемое режимом её работы, час;

Δ - стоимость 1 квт.ч потерянной энергии, руб/квт.ч.

В работе показано, что для таких генераторов увеличиваются расходы на текущий ремонт и обслуживание. Это увеличение равно:

$$Z_r'' = (p_{r_0} - p'_{r_0}) K_r, \quad (15)$$

где p_{r_0} - отчисления на текущий ремонт и обслуживание для генератора при наличии высших гармоник;

p'_{r_0} - то же, но при отсутствии высших гармоник или наличии фильтров гармоник;

K_r - капитальные вложения в генераторы.

Ущерб от воздействия высших гармоник на генераторы электрических станций определен выражением:

$$Y_{gr} = Z_r' + Z_r'' \quad (16)$$

В диссертации показано, что высшие гармоники увеличивают потери на вихревые токи и гистерезис в обмотках электрических машин, что приводит к повышенному нагреву отдельных элементов оборудования и усилению процесса старения изоляции. Это обстоятельство оказывает влияние на сроке службы различных электрических машин, особенно асинхронных и синхронных двигателей и трансформаторов. Этот вид ущерба определен выражениями:

$$Y_{gb} = \sum_{i=1}^n K_{gb} P_{gb} \cdot \frac{T_n - T'}{T_n \cdot T'}; \quad (17)$$

$$Y_{tr} = \sum_{i=1}^n K_{tr} S_{tr} \cdot \frac{T_n - T'}{T_n \cdot T'}; \quad (18)$$

где K_{gb}, K_{tr} - стоимость 1 квт и 1 ква двигательной и трансформаторной мощности соответственно, руб/квт, руб/ква;

P_{gb}, S_{tr} - суммарная мощность двигателей и трансформаторов в i -том узле системы, соответственно, квт, ква;

T_n - номинальный срок службы, соответствующий режиму работы двигателя и трансформатора с номинальными параметрами;

T' - новый срок службы, определяемый режимом нагрева изоляции вследствие воздействия высших гармоник.

Наличие высших гармонических тока и напряжения вызывает увеличение потерь активной мощности в конденсаторах, что изменяет их тепловой режим. Подобно тому, как это происходит в электрических машинах, только в больших масштабах, усиливается процесс старения изоляции и сокращается срок службы конденсаторов. В работе получено выражение для определения ущерба от воздействия высших гармоник на статические конденсаторы:

$$Y_{ск} = \sum_i \Delta P_{sk} Q_{ск} \left(\sum_{i=1}^n k_i^2 - 1 \right) \tau_u \beta + \sum_{i=1}^n K_{uy} Q_{ск} \frac{T_n - T'}{T_n \cdot T'} \quad (19)$$

где $Q_{ск}$ - мощность статических конденсаторов в i -том узле электрической сети;

k_i - отношение амплитуд напряжений каждой из гармоник к амплитуде номинального напряжения конденсаторной установки,

$$k_1 = \frac{U_1}{U_n}; \quad k_3 = \frac{U_3}{U_n}; \quad k_5 = \frac{U_5}{U_n}; \dots$$

τ_u - время потерь активной мощности в конденсаторной установке, определяемое режимом напряжений высших гармоник на шинах конденсаторной установки.

На режиме работы статических конденсаторов существенно сказываются резонансные явления, возникающие на частоте ν -той гармоники в цепях, состоящих из емкостных сопротивлений батарей статических конденсаторов, установленных на подстанциях энергосистемы и потребителей, и индуктивных сопротивлений остальных элементов электрической системы относительно шин, к которым подключена конденсаторная установка. В работе отмечено, что в этом случае возможна значительная перегрузка конденсаторных установок

и повреждение их вследствие теплового пробоя.

За счет влияния резонансных явлений при различных изменениях схемы электрической сети действительная величина ущерба Уск несколько больше, определенной по выражению (19), .

В этой главе также получено выражение мощности конденсаторной установки, при которой не возникает резонансные явления.

Многие элементы электрических сетей энергетических систем и электроприемников имеют устройства релейной защиты и автоматики, которые приходят в действие при повышении определенной величины тока и напряжении обратной последовательности.

В работе показано, что высшие гармоники порядков $\nu=5, 11, 17, \dots$ имеют обратную последовательность. При благоприятных условиях, особенно при однофазных и двухфазных коротких замыканиях на "землю" в электрической сети, токи и напряжения этих гармоник способствуют ложной работе устройств релейной защиты и автоматики.

Эту опасность ущерба от высших гармоник рекомендуется определять по выражению:

$$U_{\nu} = \sum_{i=1}^n P_n T_n U_{\nu i} a_i, \quad (20)$$

где a_i - вероятная длительность отключения i -того элемента сети из-за ложного действия устройств релейной защиты и автоматики, вызванного высшими гармониками;

$U_{\nu i}$ - удельный ущерб при отключении i -того элемента сети;

P_n - максимальная мощность, передаваемая по i -тому элементу сети;

T_n - число часов использования максимальной нагрузки.

В работе показано, что ущерб от воздействия высших гармоник на телефонную сеть практически равен дополнительным затратам в этой телефонной сети в оборудование для уменьшения помех от высших гармоник до допустимого уровня.

$$U_{\nu} = 3_{\text{гс год}}. \quad (21)$$

В диссертации приводятся расчеты ущерба и различных его составляющих от воздействия высших гармоник на элементы электрических систем и электроприемников по методике, изложенной выше для конкретных схем энергетических систем.

Четвертая глава посвящена выбору рациональных параметров фильтров высших гармоник и технико-экономическим условиям их применения.

В работе показано, что в электрических системах с мощными вентиляльно-преобразовательными установками и несинусоидальной формой кривой напряжения практически во всей электрической сети наиболее эффективным средством уменьшения высших гармоник необходимо считать применение резонансных фильтров.

Расчеты и исследования показали, что в таких электрических системах рационально устанавливать резонансные фильтры в месте генерации высших гармоник, так как при этом практически устраняются высшие гармоники во всей электрической сети системы.

В результате проведенных автором расчетов выяснено, что для каждой из высших гармоник, генерируемой в электрическую сеть мощными вентиляльно-преобразовательными установками и превышающей 3-5 % от напряжений основной частоты, необходимо иметь отдельный резонансный фильтр. Это объясняется тем, что при широкой полосе пропускания фильтра ухудшается его добротность, и напряжения отдельных высших гармоник в электрической сети практически не снижаются.

Параметры реактивных элементов резонансного фильтра зависят от тока гармоники в цепи фильтра и напряжения основной частоты в месте подключения фильтра и могут быть найдены по выражениям:

$$C_{\phi} = \frac{I_{\nu}}{\omega_{\nu} U_{\phi}} \cdot \sqrt{\frac{k}{\nu}} ; \quad (22)$$

$$L_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{\omega_{\nu} I_{\nu}} \cdot \sqrt{\frac{k}{\nu}} , \quad (23)$$

где I_{ν} - значение тока ν -той гармоники в цепи фильтра, определяемое по расчетной схеме для ν -той гармоники;

U_{φ} - фазное напряжение основной частоты в месте подключения фильтра;

k - коэффициент, учитывающий увеличение напряжения за счет ν -той гармоники,

$$k = \frac{\nu^2}{\nu^2 - 1}$$

Из рис.2 видно, как изменяются параметры фильтра при изменении тока ν -той гармоники и напряжения сети.

Значение емкости резонансного фильтра, полученное по выражению (22), соответствует минимальной емкости конденсаторной батареи фильтра.

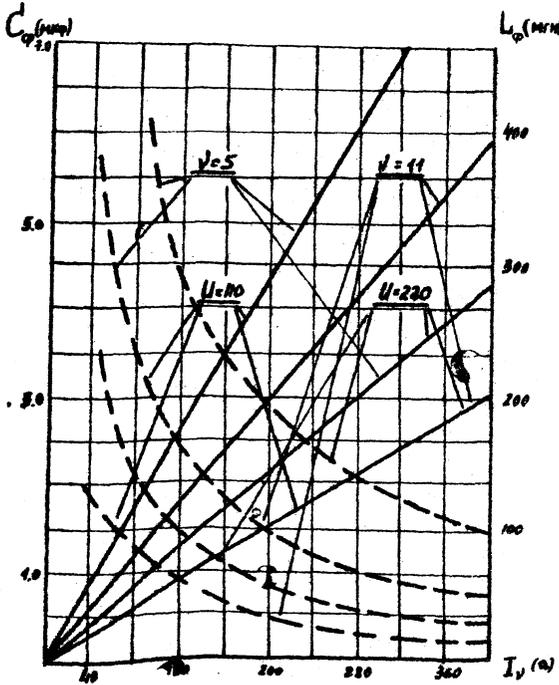


Рис. 2. Зависимость параметров фильтра от тока гармоник

C_{φ} — L_{φ} ---

На основной частоте емкостное сопротивление фильтра намного больше его индуктивного сопротивления, поэтому фильтр служит дополнительным компенсирующим устройством, мощность которого равна:

$$Q'_\varphi = 3 \cdot \frac{U_\varphi^2}{x_{\kappa}} \cdot k = 3 U_\varphi \cdot I_\varphi \cdot \sqrt{\frac{k}{\nu}}, \quad (24)$$

здесь x_{κ} — сопротивление конденсаторной батареи фильтра на основной частоте,

$$x_{\kappa} = \frac{1}{\omega \cdot C_\varphi}$$

Минимальная установленная мощность конденсаторов в фильтре ν -той гармоники равна:

$$Q_{\varphi \text{уст}} = 6 \cdot U_\varphi \cdot I_\varphi \cdot \sqrt{\frac{k}{\nu}}. \quad (25)$$

Коэффициент использования конденсаторов в фильтре меньше, чем в обычном компенсирующем устройстве, так как эти же конденсаторы служат и для поглощения токов высших гармоник.

Активное сопротивление фильтра обеспечивает сохранение его свойств при отклонениях резонансной частоты, вызванных колебаниями основной частоты в энергетической системе, и при изменении величины емкости конденсаторной батареи вследствие колебаний температуры окружающего воздуха. Величина активного сопротивления фильтра существенно влияет на его добротность и зависит от отклонений резонансной частоты:

$$R_\varphi = 2 \Delta \omega \cdot L_\varphi \quad (26)$$

Резонансные фильтры должны так осуществлять свои функции, чтобы результирующее напряжение высших гармоник в месте их установки не должно превышать 3+5 % от действующего значения напряжения основной частоты, а никакая отдельная гармоника не должна превосходить 1 + 1,5 %.

В работе отмечено, что элементы фильтра должны быть собраны таким образом, чтобы действующие значения токов и напряжений в них с учетом высших гармоник не превосходили длительно допускаяемые для этих элементов величины.

В диссертации значительное внимание уделено технико-экономическим вопросам и определению критериев экономичности установки резонансных фильтров. При решении вопроса об установке фильтров основополагающим должны быть результаты технико-экономического расчета, в котором сравниваются технико-экономические показатели фильтров и ущерб от высших гармоник в электрической системе.

Основные технико-экономические показатели фильтров - капитальные вложения K_{φ} , годовые эксплуатационные расходы Γ_{φ} и приведенные затраты Z_{φ} .

Приведенные затраты в фильтры гармоник должны определяться с учетом того, что фильтры служат и компенсирующим устройством мощностью Q_{φ} на основной частоте.

С учетом выше сказанного приведенные затраты в фильтры определены выражением:

$$Z_{\varphi} = (A_n + A_{\varphi}) \cdot \sum K_{\varphi i} + \Delta A_{\varphi} \cdot \sum Q_{\varphi i} \cdot T \cdot \beta + 3 \tau \cdot \beta \cdot \sum I_{\varphi i} (R_{\varphi i} + R_{L i}) - \\ - [(A_n + A_{\varphi}) \cdot K_{\varphi k} + \Delta A_{\varphi} \cdot \sum Q_{\varphi i}' + \Delta A_{\varphi} \cdot \sum Q_{\varphi i}' \cdot T \cdot \beta + 3 \tau \cdot \beta \cdot \sum I_{\varphi i}'] , \quad (27)$$

где A_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $A_n = 0,125$;

$A_{\varphi}, A_{\varphi k}$ - отчисления на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание для фильтров и компенсирующих установок, в долях от капитальных вложений, соответственно;

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ - число фильтров высших гармоник;

$K_{\varphi i}$ - капитальные вложения в i -тый фильтр;

ΔA_{φ} - удельные потери активной мощности в конденсаторной батарее фильтра;

$Q_{\varphi i}, Q_{\varphi i}'$ - установленная мощность конденсаторов и мощность i -того фильтра как компенсирующего устройства, соответственно;

T - число часов работы фильтра в году;

$I_{\phi i}$ - действующее значение тока в i -том фильтре

$$I_{\phi} = \sqrt{\sum I_{\phi i}^2}$$

$R_{\phi i}, R_{Li}$ - активное сопротивление i -того фильтра и его реактора, соответственно;

$K_{\text{квк}}$ - стоимость 1 квар мощности конденсаторов фильтра;

$З_{\text{АП}}$ - стоимость сэкономленных потерь энергии в электрической системе.

Фильтры высших гармоник будут экономически оправданы, если приведенные затраты на их установку, определенные по выражению (27), меньше или равны величине ущерба от высших гармоник, определенного по выражению (10) и как разница между ущербом до и после установки фильтра, т.е. фильтры должны давать народнохозяйственный эффект:

$$З_1 = З_2 - З_3 \quad (28)$$

Отрицательная величина эффекта $З_3$ означает, что установка резонансных фильтров экономически нецелесообразна.

Одним из критериев экономичности фильтров гармоник служит срок его окупаемости:

$$T_{\phi} = \frac{K_{\text{квк}}}{З_3} \quad (29)$$

Анализ расчетов, проведенных автором для различных схем, разных значений величин высших гармоник, показал, что установка резонансных фильтров экономически оправдана, если действующее значение напряжения гармоник в большинстве узлов электрической сети превышает $3,0 + 4,0$ % от напряжения основной частоты.

По предложенной автором методике кафедрой "Электрические системы и сети" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института с участием автора выполнена

работа по исследованию высших гармоник в одной из крупнейших энергосистем Европейской части СССР. Были произведены, в ходе выполнения работы, под руководством автора экспериментальные измерения величин гармоник, расчеты гармоник в основных сетях 110+220 кв энергосистемы с применением ЦВМ Урал-4 и статической модели переменного тока, определен ущерб от гармоник в системе и выбраны параметры резонансных фильтров. Срок окупаемости рекомендуемых фильтров II-й и III-й гармоник составил 1,6 года, а народнохозяйственный эффект - около 270 тысяч рублей в год. Напряжение гармоник в основной электрической сети системы при этом снижается с 6+10 % до 0+1,5 %.

Результаты работы приняты к внедрению в энергетической системе.

Коротко результаты работы можно сформулировать в следующем виде:

1. Получены соотношения и разработана методика, позволяющая исследовать качество электроэнергии в энергосистемах с вентиляльно-преобразовательными установками большой мощности и определить влияние несинусоидальности формы кривой напряжения на работу энергетических установок.

2. Рассмотрены возможности расчета высших гармоник в сложно-замкнутых электрических сетях с помощью ЭЦВМ и статических моделей электрических систем. Предложен алгоритм расчета высших гармоник на ЭЦВМ и моделях переменного тока.

3. Показано, что при эквивалентировании элементов электрических систем в схемах замещения для расчетов высших гармоник необходимо учитывать волновой характер распространения электромагнитной энергии.

4. Выяснено влияние различных факторов на распределение высших гармоник в электрической системе.

5. Изучено влияние высших гармоник на технико-экономические показатели элементов энергетических систем. Выяснено, что высшие гармоники увеличивают потери энергии в электрических сетях и усиливают процесс старения изоляции электрических машин и статических конденсаторов.

6. В работе предложена методика определения ущерба от высших гармоник в электрической системе.

7. Изучены и сопоставлены различные мероприятия борьбы с высшими гармониками, установлены области их применения.

8. В электрических системах с преобразовательными установками большой мощности для устранения несинусоидальности формы кривой напряжения рекомендуется применять резонансные фильтры. Получены выражения для определения параметров этих фильтров.

9. Дана оценка влияния величин высших гармоник и отклонений рабочей частоты на параметры фильтров.

10. Получены технико-экономические показатели фильтров и критерии экономичности их установки.

Основное содержание диссертации нашло отражение в следующих опубликованных статьях:

1. Царегородцев В.А. Некоторые вопросы из опыта эксплуатации передачи постоянного тока Волгоград-Донбасс. Материал к XXV научно-технической конференции БПИ совместно с работниками промышленности, Энергетическая секция, Минск, 1969.

2. Царегородцев В.А. О появлении высших гармоник тока и напряжения в электрических системах при наличии мощных преобразовательных подстанций. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых ученых Белоруссии, Минск, 1969.

3. Поспелов Г.Е., Царегородцев В.А. Электрические расчеты установившихся режимов энергосистем с учетом высших гармоник. Материалы к XXVI научно-технической конференции БПИ совместно с работниками промышленности, Энергетическая секция, Минск, 1970.

4. Царегородцев В.А. Применение программ расчета на ЦВМ установившихся режимов энергосистем для определения токов и напряжений высших гармонических в сложно-замкнутых сетях. Тезисы докладов III республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике, Минск, 1970.

5. П о с п е л о в Г.Е., Ц а р е г о р о д ц е в В.А. Электроэнергия и её качество. "Промышленность Белоруссии", № 6, 1971.

6. П о с п е л о в Г.Е., Ф е д и н В.Т., Ц а р е г о р о д ц е в В.А. Исследование и повышение качества энергии в системах с мощными нелинейными элементами. Тезисы докладов 4-ой Всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, Ташкент, 1971.

7. П о с п е л о в Г.Е. (руководитель работы), Ц а р е г о р о д ц е в В.А. (ответственный исполнитель) и др. Определение экономически целесообразной мощности и параметров специальных устройств (фильтров), устраняющих несинусоидальность формы кривой напряжения и тока в основных сетях 110 + 220 кв энергосистемы "Волгоградэнерго". Отчет по НИР, Минск, 1971.

Содержание работы докладывалось автором на XXV, XXVI, XXVII научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института в 1969, 1970, 1971 гг., на I научно-технической конференции молодых ученых Белоруссии по техническим и сельскохозяйственным наукам в 1969 г. (г.Минск), на III республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике в 1970 г. (г.Минск).

АТ 03608. Подписано в печать 7/X-1971г.

Формат 60x84¹/16. Объем I, 5 печ. л., I, 7уч.-изд. л. Тир. 200. Зак. 803. Бесплатно.

БПИ. Минск, Ленинский пр., 65.