

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ
ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ
ПРЕРЫВИСТОГО ВХОДНОГО ТОКА СИСТЕМЫ
«ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ –
АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»**

Б.И. ФИРАГО, К.М. МЕДВЕДЕВ

*Учреждение образования «Белорусский национальный
технический университет», г. Минск*

1. Введение

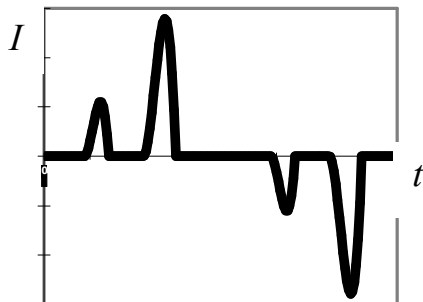
В последние годы в Республике Беларусь идёт весьма активное внедрение в промышленное производство энергосберегающих преобразователей частоты (ПЧ), которые применяются для эффективного управления режимами работы асинхронных электродвигателей (АД). В результате стало возникать множество проблем, связанных с эксплуатацией данных устройств. Одна из них лежит в области электромагнитной совместимости системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД) с питающей сетью. Суть данной проблемы заключается в том, что ПЧ являются весьма мощными генераторами высших гармоник тока в систему электроснабжения, которые в свою очередь приводят к искажению кривой питающего напряжения и создают дополнительные потери мощности в сети.

Самой распространённой из современных систем ПЧ-АД в диапазоне мощностей 0,1 – 1000 кВт является система с неуправляемым выпрямителем (НВ) и широтно-импульсной модуляцией [1].

Одной из особенностей таких систем является их работа в режиме прерывистого входного (сетевого) тока при потребляемой мощности, достигающей 100 и более кВт. Это объясняется низким сопротивлением питающей сети, а также работой ПЧ-АД с нагрузкой, ниже номинальной.

Прерывистый входной ток системы ПЧ-АД с шестипульсным НВ может быть как симметричным, так и несимметричным (рис.1). В кривой несимметричного сетевого тока возникают неканонические (не соответствующие спектру симметричной кривой) гармоники.





б

Рис. 1. Симметричный (а) и несимметричный (б) входной ток системы ПЧ-АД

Уровень несимметрии сетевого тока (а, следовательно, и уровень неканонических гармоник) зависит от характера и степени несоответствия условий работы системы ПЧ-АД идеальным условиям. В [2] к неидеальным условиям работы вентильных преобразователей (ВП), приводящих к возникновению неканонических гармоник сетевого тока, относятся:

- 1) искажение и несимметрия напряжений питающей сети, а также несимметрия полных сопротивлений системы;
- 2) модуляция постоянного тока в цепи «выпрямитель – инвертор»;
- 3) неидеальная система управления углами зажигания вентилей (для управляемых ВП).

В литературных источниках имеются упоминания о влиянии неидеальных условий работы вентильных преобразователей на гармонический состав их входных токов. Так, в [2] и [3] приведена качественная оценка влияния различных (в том числе и описанных выше) неидеальных условий работы ВП на уровень гармонических искажений на стороне переменного и выпрямленного тока. А в [4] дан анализ влияния несимметрии управляющих импульсов системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и несимметрии напряжения питающей сети на уровень неканонических гармоник непрерывного сетевого тока мощных управляемых ВП.

Как уже было сказано, современные системы ПЧ-АД, имеющие на стороне переменного тока в качестве ВП шестипульсный НВ, часто работают в режиме прерывистого сетевого тока. Гармонический состав такого тока количественно весьма существенно отличается от спектра сетевого тока идеальной прямоугольной (или трапецеидальной) формы. А если к этому добавить неканонические гармоники, обусловленные несимметрией напряжений питающей сети, то характер негативного влияния работы ПЧ-АД на систему электроснабжения может стать непредсказуем.

Таким образом, целью данной статьи является некоторая качественная и количественная оценка влияния несимметрии напряжения питающей сети (как параметра, довольно просто контролируемого в условиях эксплуатации электрических сетей предприятий) на гармонический состав прерывистых входных (сетевых) токов системы ПЧ-АД.

2. Методика проведения исследований

Авторами данной статьи была разработана математическая модель, позволяющая исследовать прерывистые входные (сетевые) токи системы ПЧ-АД при любом виде несимметрии питающей сети. Модель учитывает полные фазные сопротивления системы электроснабжения, ёмкость фильтра в цепи выпрямленного тока, а также активное и индуктивное сопротивление эквивалентной нагрузки. Исследования

влияния несимметрии напряжения питающей сети на гармонический состав сетевых токов ПЧ-АД проводились с помощью данной модели.

Согласно [5], несимметрия напряжения характеризуется двумя показателями:

- коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \% , \quad (1)$$

- коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \% , \quad (2)$$

где $U_{2(1)}$ – действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трёхфазной системы напряжений; $U_{0(1)}$ – действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты трёхфазной системы напряжений; $U_{1(1)}$ – действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты (в выражении (1) – фазное или междуфазное в зависимости от того, система фазных или междуфазных напряжений рассматривается в расчётах; в (2) – междуфазное).

В [5] приведены также и нормально допустимые значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям в точках общего присоединения к электрическим сетям, которые не должны превышать 2 %.

Для получения двумерных зависимостей гармонического состава сетевых токов трёх фаз от амплитудной несимметрии напряжения питающей сети в качестве параметра несимметрии можно было бы использовать именно K_{2U} . Однако эти зависимости не будут являться однозначными, поскольку данный параметр может принимать одни и те же значения при различных соотношениях напряжений трёхфазной системы. Так, например, $K_{2U} = 0,46\%$ как при системе фазных напряжений, имеющих действующие значения $U_A = 217$ В, $U_B = 220$ В, $U_C = 220$ В, так и при $U_A = 218$ В, $U_B = 220$ В, $U_C = 221,5$ В.

Более наглядными и однозначными двумерные зависимости можно сделать, применив в качестве аргумента величину отклонения одного из фазных напряжений трёхфазной системы от напряжений двух других фаз, которые принимаются равными между собой. Так, при изменении действующего значения фазного напряжения U_1 , когда действующие значения напряжений двух других фаз (U_2 и U_3) равны между собой, можно получить однозначные зависимости гармонического состава сетевых токов ПЧ-АД от параметра ΔU_1 , который будет определяться выражением

$$\Delta U_1 = \frac{U_1 - U_{2,3}}{U_{2,3}} \cdot 100, \% , \quad (3)$$

где U_1 – действующее значение изменяемого фазного напряжения трёхфазной системы напряжений питающей сети; $U_{2,3}$ – действующие значения неизменных и равных между собой фазных напряжений трёхфазной системы напряжений питающей сети.

В этом случае коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности будет также изменяться однозначным образом, т. е. расти с увеличением абсолютного значения величины ΔU_1 .

Однако такой способ представления данных в большинстве случаев не будет в достаточной степени адекватно отражать картину распределения токов высших гармоник по фазам, поскольку в реальной сети при наличии несимметрии действующие значения всех фазных напряжений, как правило, различаются между собой.

В этом случае можно использовать трёхмерные зависимости, представляющие собой поверхности, по которым значения гармоник тока можно определить, зная соотношения напряжений трёхфазной системы. Тогда, например, по оси X будет откладываться параметр ΔU_{1_2} , а по оси Y – параметр ΔU_{1_3} , которые могут быть определены по следующим выражениям:

$$\Delta U_{1_2} = \frac{U_1 - U_2}{U_2} \cdot 100, \% , \quad (4)$$

$$\Delta U_{1_3} = \frac{U_2 - U_3}{U_2} \cdot 100, \% , \quad (5)$$

где U_1, U_2, U_3 – действующие значения фазных напряжений питающей сети.

Этот способ представления результатов исследований хоть и обладает полнотой отражения рассматриваемых процессов, однако требует наличия большого объёма экспериментальных данных и необходимости построения отдельного графика для каждой гармоники сетевого тока каждой фазы из-за плохой наглядности зависимостей при попытке совмещения нескольких поверхностей в одних осях.

При исследовании фазовой несимметрии в качестве параметра несимметрии для построения двухмерных зависимостей можно использовать величину

$$\Delta \varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_{1.H.}, \text{ град.}, \quad (6)$$

где φ_1 – значение изменяемого фазового угла; $\varphi_{1.H.}$ – номинальное значение фазового угла напряжения той фазы, угол которой изменяется (для фазы А $\varphi_{1.H.} = 0$, для фазы В $\varphi_{1.H.} = -120^\circ$, для фазы С $\varphi_{1.H.} = 120^\circ$).

Для построения трёхмерной зависимости к параметру $\Delta \varphi_1$ нужно добавить $\Delta \varphi_2$, определяемый аналогично (6), но для другой фазы. При этом для получения однозначных зависимостей значение фазового угла третьей фазы φ_3 нужно зафиксировать на номинальном значении.

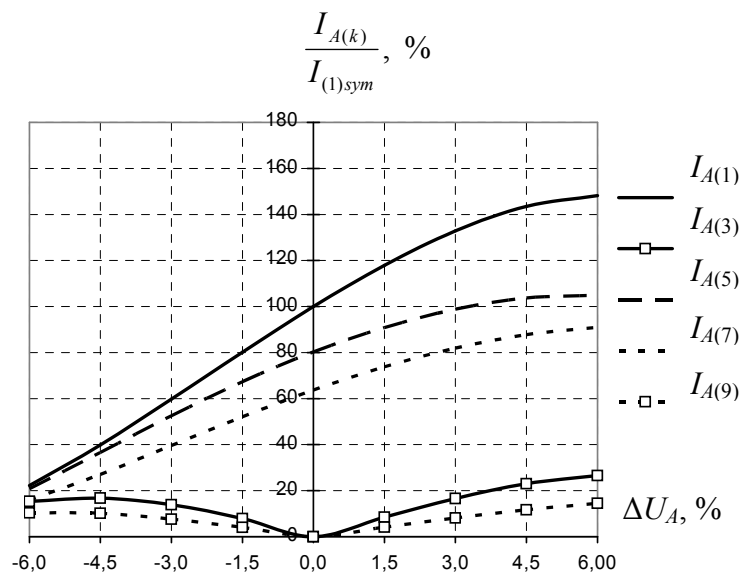
Необходимо отметить, что, поскольку в цеховой электрической сети наибольшим индуктивным сопротивлением (которое сильно влияет на форму кривых входных токов системы ПЧ-АД) обладает, как правило, питающий трансформатор, то для получения адекватных результатов моделирования несимметрию напряжений нужно задавать на шинах высокого напряжения (6 или 10 кВ) трансформаторной подстанции (ТП). Следует также сказать, что зависимости гармонического состава входного тока системы ПЧ-АД от параметров, определённых (3) – (6), будут отличаться друг от друга в зависимости от того, какая схема и группа соединений обмоток используется в трансформаторе ТП.

3. Результаты экспериментов

С помощью упомянутой выше математической модели было проведено моделирование входных (сетевых) токов системы ПЧ-АД для различных мощностей АД. В качестве источника питания был взят трансформатор 10 кВ / 0,4 кВ мощностью 1000 кВА со схемой соединения обмоток «звезда – звезда с нулём» нулевой группы. Сопротивление трансформатора было приведено к напряжению сети 0,4 кВ.

Для задания амплитудной несимметрии напряжений использовалось выражение (3), где напряжениям U_1 , U_2 и U_3 соответствовали действующие значения фазных напряжений U_A , U_B и U_C . Напряжение U_A изменялось таким образом, чтобы коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} лежал в пределах нормально допустимых значений, т. е. 2 % (табл.1). Напряжения U_B и U_C были приняты равными между собой.

Далее был рассчитан гармонический состав полученных в результате моделирования кривых тока для трёх фаз и построены зависимости токов первой и наиболее значимых высших гармоник канонического и неканонического порядков $I_{(k)}$, отнесённых к току первой гармоники симметричного режима $I_{(1)sym}$, от параметра ΔU_A для системы ПЧ-АД с номинальной мощностью АД, равной 37 кВт (рис. 2).



а

$$\frac{I_{B(k)}}{I_{(1)sym}}, \%$$

$I_{B(1)}$

$I_{B(3)}$

$I_{B(5)}$

$I_{B(7)}$

$I_{B(9)}$

$\Delta U_A, \%$

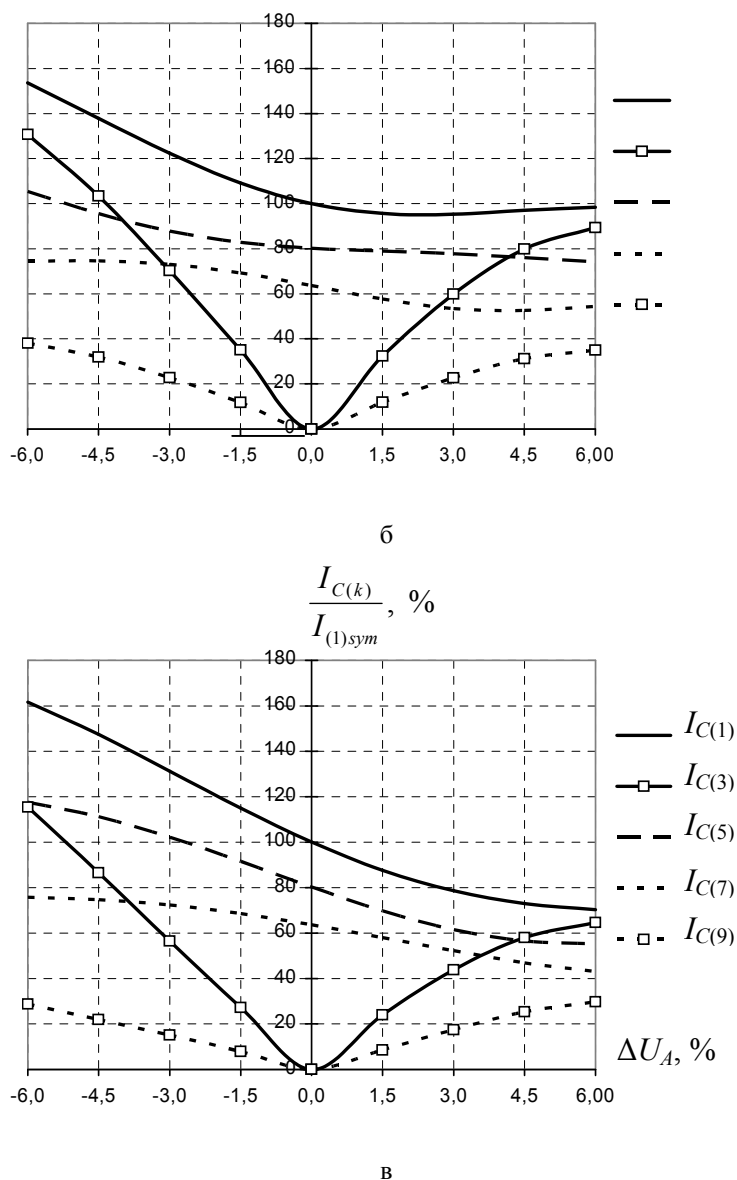


Рис. 2. Зависимости токов первой и высших гармоник входного тока системы ПЧ-АД с АД мощностью 37 кВт, выраженных в %-х к первой гармонике симметричного режима, от параметра ΔU_A : (а) – фаза А; (б) – фаза В; (в) – фаза С

Кроме того, было проведено моделирование сетевых токов ПЧ-АД при фазовой несимметрии напряжения питающей сети и рассчитаны зависимости гармонического состава от величины $\Delta\varphi_A$, определяемой по выражению (6), т.е. при изменении фазового угла напряжения фазы А. Фазовые углы напряжений фаз В и С были приняты равными своим номинальным значениям, т.е. -120 град. и 120 град. соответственно. Характеристика фазовой несимметрии приведена в табл. 2.

Таблица 1

Параметры амплитудной несимметрии

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_A, В$	206,8	210,1	213,4	216,7	220	223,3	226,6	229,9	233,2

$\Delta U_A, \%$	-6,0	-4,5	-3,0	-1,5	0	1,5	3,0	4,5	6,0
$K_{2U}, \%$	2,04	1,52	1,01	0,503	0	0,498	0,99	1,48	1,96

Таблица 2

Параметры фазовой несимметрии

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varphi_A, \text{град.}$	-3,5	-2,5	-1,3	-0,5	0	0,5	1,2	2,7	3,6
$\Delta\varphi_A, \text{град.}$	-3,5	-2,5	-1,3	-0,5	0	0,5	1,2	2,7	3,6
$K_{2U}, \%$	2,04	1,46	0,756	0,291	0	0,291	0,716	1,57	2,09

Также по результатам гармонического анализа кривых сетевого тока ПЧ-АД с АД мощностью 37 кВт, рассчитанных при амплитудной несимметрии питающего напряжения, были построены зависимости коэффициента гармоник тока $K_{Г.Т.}$ трёх фаз от параметра ΔU_A (рис. 3). Коэффициент $K_{Г.Т.}$, согласно [6], определялся по выражению

$$K_{Г.Т.} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{(k)}^2}}{I} \cdot 100 =, \%, \quad (7)$$

где k – номер гармоники тока; $I_{(k)}$ – действующее значение k -й гармоники тока; I – действующее значение тока.

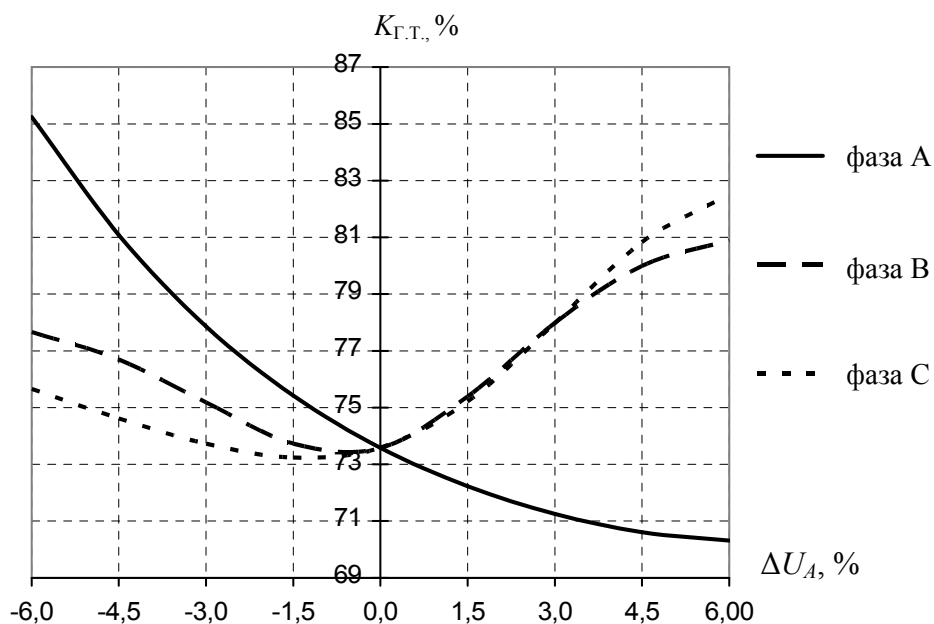


Рис. 3. Зависимости коэффициентов гармоник входного тока системы ПЧ-АД с АД мощностью 37 кВт от параметра ΔU_A .

4. Выводы

По результатам исследований были сделаны следующие выводы.

1) Изучение влияния несимметрии напряжения питающей сети на гармонический состав входного тока системы ПЧ-АД необходимо для более полного понимания характера поведения высших гармонических составляющих токов и напряжений в электрических сетях промышленных объектов.

2) Представление гармоник тока в виде отношения к току 1-й гармоники симметричного режима работы системы ПЧ-АД позволяет проследить, как изменяется распределение их значений по фазам в зависимости от уровня несимметрии напряжения питающей сети.

3) Анализируя рис.2 можно отметить следующее:

- при несимметрии напряжения питающей сети, лежащей в пределах нормально допустимых значений, может возникать весьма значительная несимметрия кривых входных (сетевых) токов системы ПЧ-АД как по форме, так и по действующим значениям;
- при несимметрии напряжения питающей сети в кривых входных токов системы ПЧ-АД появляются нечётные неканонические гармоники, кратные трём, амплитуды которых могут достигать и даже превышать значения амплитуд канонических гармоник;
- зависимость уровней канонических гармоник тока от несимметрии напряжения оказалось более выраженной в той фазе, напряжение которой изменялось по отношению к двум другим, равным между собой;
- зависимость токов неканонических гармоник от несимметрии напряжения оказалась выражена гораздо сильнее в тех двух фазах, напряжения которых не изменялись и были равными между собой;
- несмотря на то, что напряжения двух фаз в течение эксперимента оставались неизменными и равными между собой, зависимости гармонического состава токов этих фаз от несимметрии напряжения заметно отличаются друг от друга; отличаются также и уровни токов высших гармоник при аналогичных отрицательных и положительных значениях ΔU ;

4) Из рис.3 видно, что содержание гармоник в токе той фазы, напряжение которой изменялось, уменьшается с увеличением этого напряжения, т.е. с изменением параметра ΔU от отрицательных значений к положительным. Коэффициенты гармоник тока двух других фаз имеют минимумы вблизи нулевой несимметрии питающего напряжения, и при этом их значения заметно больше при положительных значениях ΔU , чем при аналогичных отрицательных.

5) Влияние фазовой несимметрии напряжения питающей сети на гармонический состав сетевого тока выражено сильнее, чем влияние амплитудной несимметрии.

6) Чем больше мощность отдельной системы ПЧ-АД, тем меньшее влияние оказывает несимметрия напряжения питающей сети на гармонический состав и уровень несимметрии её входных токов. При переходе работы ПЧ-АД в режим непрерывного входного тока влияние несимметрии, лежащей в пределах нормально допустимых значений, на его форму становится незначительным.

Литература

1. Фираго Б.И. Теория электропривода: Учеб. пособие /Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527с.
2. Аррилага Дж. и др. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320с.: ил.

3. Arrillaga J., Watson N.R. Power system harmonics. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2003.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331с.: ил.
5. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Мн.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997.
6. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.

Получено 30.06.2005 г.