

к.т.н. Кухарев А. Л.
(СУНИГОТ УИПА г. Стаханов, Украина,
alex.kuharev@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОСДВИГАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ КАСКАДНОГО ТИПА

В пакеті Matlab / Simulink розроблена комп'ютерна модель багатообмоткового фазосувного трансформатору, що реалізує 36-пульсну схему перетворення змінної напруги. Спільно з моделлю високовольтного перетворювача частоти каскадного типу досліджено гармонічний спектр струму, що споживається від мережі.

Ключові слова: багатообмотковий трансформатор, зсув фаз, зменшення гармонік, моделювання.

В пакете Matlab / Simulink разработана компьютерная модель многообмоточного фазосдвигающего трансформатора, реализующего 36-пульсную схему выпрямления переменного напряжения. Совместно с моделью высоковольтного преобразователя частоты каскадного типа исследован гармонический состав потребляемого от сети тока.

Ключевые слова: многообмоточный трансформатор, сдвиг фаз, уменьшение гармоник, моделирование.

Постановка проблемы. В связи с интенсивным развитием силовой электроники все большее количество высоковольтных электроприводов оснащаются двухзвенными преобразователями частоты, которые, как правило, выполняются на базе неуправляемых выпрямителей и многоуровневых автономных инверторов напряжения. При проектировании и наладке таких преобразователей широко применяются современные пакеты компьютерного моделирования, например Matlab / Simulink [1, 2].

Известно, что выпрямители являются потребителями несинусоидального тока, спектр гармоник которого существенно зависит от схемы преобразования переменного напряжения в постоянное. Несинусоидальность входного тока выпрямителя с учетом сопротивления системы приводит к появлению высших гармоник и искажению питающего напряжения, оказывая влияние на соседние потребители.

Существуют различные методы уменьшения высших гармоник, наиболее эффективным из которых является увеличение пульсности выпрямленного напряжения за счет использования двух и более парал-

лельных выпрямителей. При этом гармоники, генерируемые одним выпрямителем, компенсируются другим выпрямителем за счет соответствующего изменения фаз входного напряжения [3,4].

Анализ последних исследований и публикаций. Известно достаточно большое количество схем с повышенной пульсностью преобразования, которые могут использовать как один трансформатор с несколькими вторичными обмотками, имеющими различные схемы и группы соединения, так и параллельное включение трансформаторов [3]. Для обеспечения сдвига фаз на угол 30° , например в 12-пульсных схемах выпрямления, используются различные комбинации схем «звезда» и «треугольник». Если необходимо обеспечить угол сдвига фаз менее 30° , то для этого наиболее распространены схемы «зигзаг» и «треугольник-авто» [3, 5].

В [4-6] исследованы режимы работы фазосдвигающего трансформаторного оборудования, реализующего 18-ти и 24-пульсные схемы выпрямления. Однако в [2] отмечено, что для высоковольтных преобразователей частоты (ВПЧ) каскадного типа необходимо применение фазос-

двигающих трансформаторов, реализующих 36-пульсную схему выпрямления, особенностям расчета и моделирования которых в литературных источниках уделено недостаточно внимания.

Целью данной статьи является усовершенствование методики моделирования фазосдвигающих трансформаторов для ВПЧ каскадного типа, реализующих 36-пульсную схему выпрямления.

Материалы и результаты исследований. В качестве объекта исследования принят многообмоточный фазосдвигающий трансформатор PZSG-2400/6, изготовленный компанией Sunel.

Данный трансформатор содержит первичную обмотку, соединенную в звезду, напряжением 6000 В и 3 группы вторичных обмоток, соединенных по схеме «треугольник-авто» (по 6 обмоток в каждой группе напряжением 660 В).

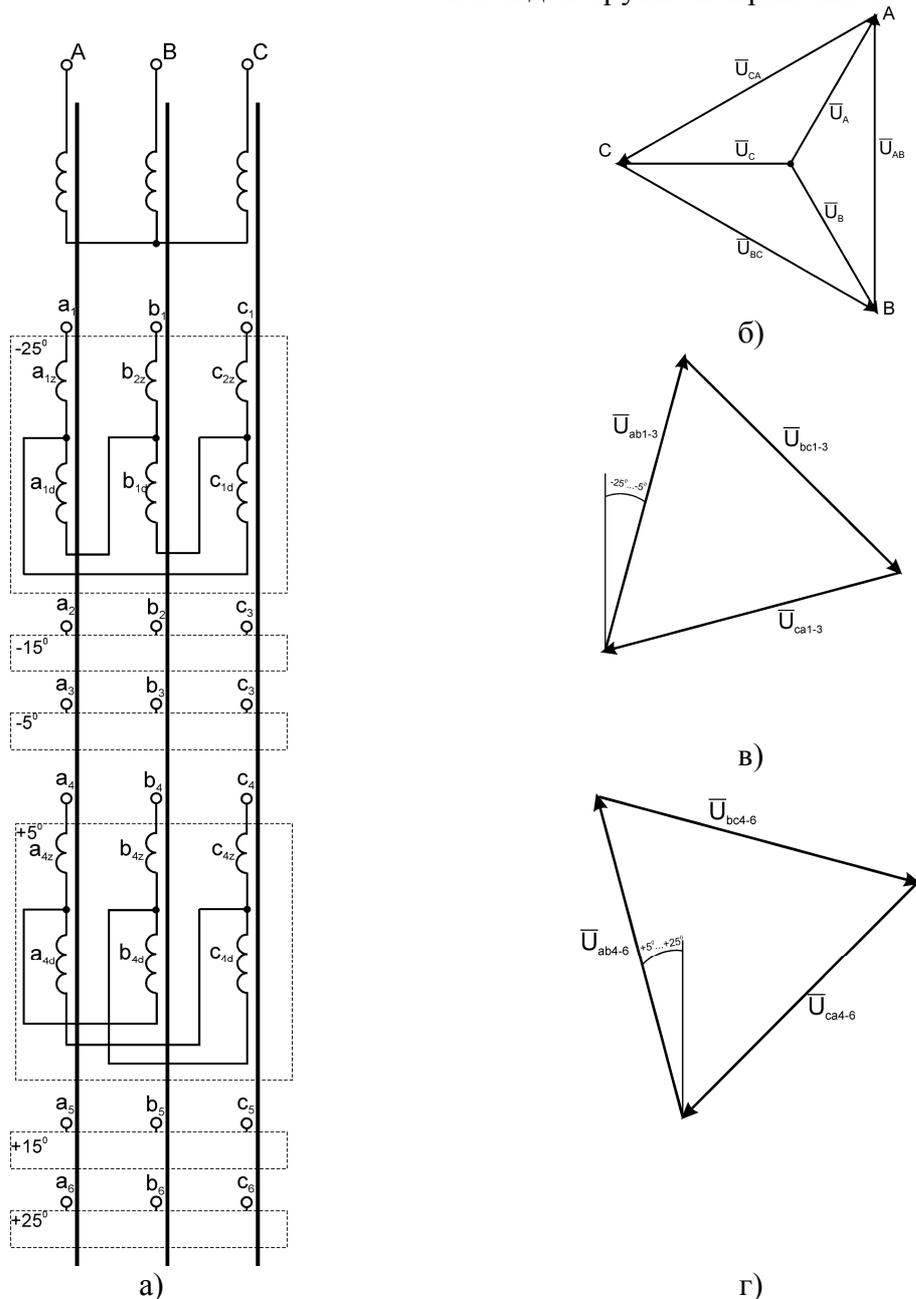


Рисунок 1 – Трансформатор PZSG-2400/6: а)–схема соединения обмоток; б)–векторная диаграмма напряжений первичной обмотки; в)–векторная диаграмма напряжений вторичных обмоток №1-3; г)–векторная диаграмма напряжений вторичных обмоток №4-6

Фазовый угол выходного напряжения вторичных обмоток в каждой группе распределяется в следующем порядке: -25° ; -15° ; -5° ; 5° ; 15° ; 25° . К этим обмоткам трансформатора подключаются вентиляционно-инверторные блоки, каждый из которых имеет в своем составе неуправляемый выпрямитель, выполненный по трехфазной мостовой схеме (схема Ларионова) [2]. Кроме того, в данном трансформаторе имеется дополнительная вторичная обмотка напряжением 380 В, соединенная в звезду, которая используется для питания вентиляторов охлаждения и собственных нужд преобразователя.

Схема соединения первичной обмотки и вторичных обмоток первой группы приведена на рисунке 1а. Векторные диаграммы первичных и вторичных напряжений показаны на рисунках 1б, 1в, 1г.

На схеме (рисунок 1а): А, В, С – выводы первичной обмотки; a_d, b_d, c_d – основные части вторичных обмоток, соединенные в треугольник; a_z, b_z, c_z – дополнительные части вторичных обмоток (до соединения в треугольник).

Для расчета параметров модели данного трансформатора рассмотрим принципы формирования его выходного напряжения. Примем следующие значения начальных фаз линейных напряжений на первичной стороне трансформатора: $\varphi_{AB}=0^\circ$, $\varphi_{AB}=-120^\circ$, $\varphi_{CA}=120^\circ$. Тогда начальные фа-

зы фазных напряжений первичной обмотки будут соответственно равны $\varphi_A=-30^\circ$, $\varphi_B=-150^\circ$, $\varphi_C=90^\circ$. Необходимый фазовый сдвиг между векторами напряжений в группе можно рассчитать по выражению [4]:

$$\psi = \frac{60^\circ}{N_g}, \quad (1)$$

где N_g – количество параллельных 6-типульсных выпрямителей.

Т.е. при 6 параллельных выпрямителях для обеспечения 36-пульсной схемы выпрямления необходимо обеспечить в каждой группе угол сдвига между напряжениями 10° , при этом величина выходного напряжения должна быть постоянной (рисунок 2).

Следует отметить, что рассматриваемый трансформатор имеет два принципиальных отличия в схемах соединения вторичных обмоток. Основные части вторичных обмоток №1-3 включены по схеме прямого треугольника, т.е. конец фазы «а» соединяется с началом фазы «b», конец фазы «b» - с началом фазы «с», а конец фазы «с» - с началом фазы «а». Основные части вторичных обмоток №4-6 включены по схеме обратного треугольника, т.е. конец фазы «а» соединяется с началом фазы «с», конец фазы «b» - с началом фазы «а», а конец фазы «с» - с началом фазы «b».

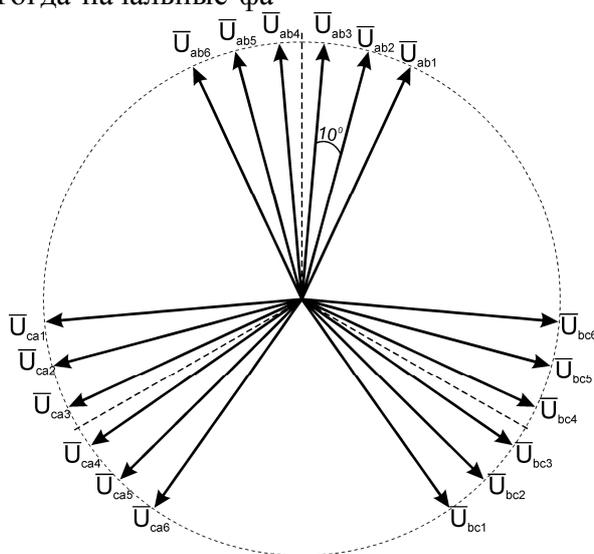
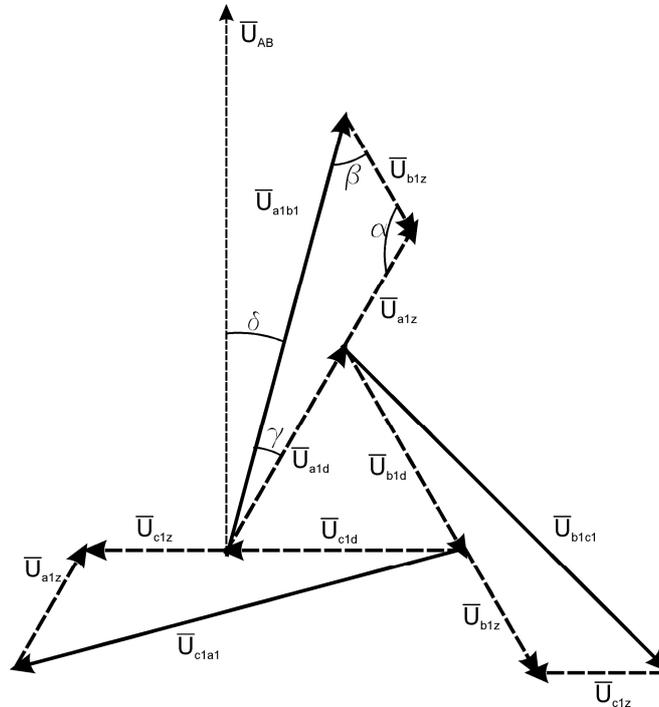


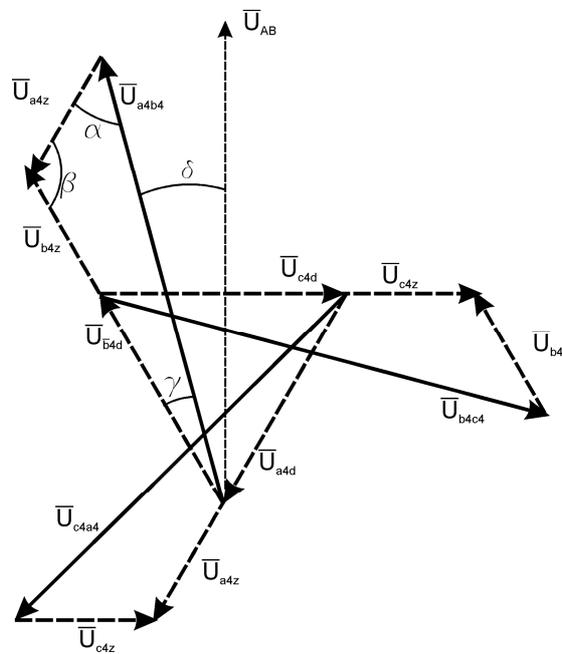
Рисунок 2 – Диаграмма векторов вторичных напряжений фазосдвигающего трансформатора

Принцип формирования векторов выходных напряжений поясняется векторными диаграммами, приведенными на рисунке 3.

В общем случае выходное напряжение формируется как векторная сумма напряжений нескольких частей обмоток, расположенных на разных стержнях.



а)



б)

Рисунок 3 – Диаграмма векторов вторичных напряжений:
а)- для обмотки № 1; б)- для обмотки №4

Так как в обмотках №1-3 используется схема прямого треугольника, то векторы \vec{U}_{ad} , \vec{U}_{bd} , \vec{U}_{cd} образуют векторный треугольник с движением векторов по часовой стрелке (рисунок 3а), а вектор выходного напряжения между выводами а и в например, для первой обмотки, будет сформирован с учетом выражения:

$$\vec{U}_{abl} = \vec{U}_{alz} + \vec{U}_{ald} - \vec{U}_{blz}, \quad (2)$$

где \vec{U}_{alz} - напряжение дополнительной части обмотки, расположенной на стержне А, до соединения в «треугольник»;

\vec{U}_{ald} - напряжение основной части обмотки, расположенной на стержне А, соединяемой в «треугольник»;

\vec{U}_{blz} - напряжение дополнительной части обмотки, расположенной на стержне В до соединения в треугольник.

В обмотках №4-6 используется схема обратного треугольника, поэтому векторы \vec{U}_{ad} , \vec{U}_{bd} , \vec{U}_{cd} образуют векторный треугольник с движением векторов против часовой стрелки (рисунок 3б), а вектор выходного напряжения между выводами а и в например, для четвертой обмотки, будет сформирован с учетом выражения:

$$\vec{U}_{a4b4} = \vec{U}_{b4z} + \vec{U}_{b4d} - \vec{U}_{a4z}, \quad (3)$$

где \vec{U}_{b4z} - напряжение дополнительной части обмотки, расположенной на стержне В, до соединения в «треугольник»;

\vec{U}_{b4d} - напряжение основной части обмотки, расположенной на стержне В, соединяемой в «треугольник»;

\vec{U}_{a4z} - напряжение дополнительной части обмотки, расположенной на стержне А до соединения в треугольник.

Таким образом, напряжение на остальных обмотках определяются по аналогичным выражениям.

На рисунке 3 углом δ обозначен требуемый угол сдвига линейного вторичного

напряжения относительно линейного первичного напряжения. Значения напряжений на основных и дополнительных частях обмоток можно рассчитать геометрически.

На рисунке 3а векторы \vec{U}_{abl} , \vec{U}_{blz} и сумма векторов $\vec{U}_{ald} + \vec{U}_{alz}$ образуют векторный треугольник. Из рисунка видно, что угол γ дополняет угол δ до угла $\varphi_A = -30^\circ$. Угол α и угол между векторами \vec{U}_{alz} и \vec{U}_{blz} являются вертикальными и равны 120° . По такому же принципу определяется угол β . Аналогичным образом определяются углы для рисунка 3б.

Так как известно, что модуль вектора $U_{ab} = 660 \text{ В}$, то, используя теорему синусов, можно рассчитать значения напряжений на основных и дополнительных частях обмоток. Для рассматриваемого примера:

$$U_{az} = U_{ab} \frac{\sin(\gamma)}{\sin(\alpha)}, \quad (4)$$

$$U_{ad} = U_{ab} \left(\frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} - \frac{\sin(\gamma)}{\sin(\alpha)} \right). \quad (5)$$

Результаты расчета напряжений на основных и дополнительных частях обмоток приведены в таблице 1.

Полученные данные позволили сформировать модель данного трансформатора в системе Matlab / Simulink, структурная схема которой приведена на рисунке 4.

Разработанная модель состоит из трех блоков «Multiwinding transformer», каждый из которых имитирует фазы А, В, С трехфазной системы реального трансформатора. Каждая фаза модели состоит из 36 полюбомоток, соединяемых между собой аналогично рисунку 1а. Таким образом, в модели имеется 18 трехфазных обмоток, соединенных по схеме «треугольник-авто» (выводы А1...18, В1...18, С1...18). Также в модели имеется дополнительная вторичная обмотка, напряжением 380 В, соединенная в звезду (выводы А19, С19, С19).

Таблица 1 – Результаты расчета напряжений на основных и дополнительных частях обмоток трансформатора PZSG-2400/6

Номер обмотки в группе	Фазовый угол δ	Напряжение, В	
		U_d , В	U_z , В
1	-25°	557,9	66,4
2	-15°	341,6	197,2
3	-5°	115	322,1
4	5°	115	322,1
5	15	341,6	197,2
6	25	557,9	66,4

Кроме рассчитанных значений напряжений в модель фазы трансформатора задаются значения активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния обмоток, а также параметры ветви намагничивания в виде вебер-амперной характеристики и активного сопротивления, характеризующего потери в стали магнитопровода. В данном случае кривая намагничивания задавалась кусочно-линейной характеристикой. Расчет этих параметров модели проводился по методике, приведенной в [7].

С использованием разработанной модели данного трансформатора и модели преобразователя частоты исследованы процессы, протекающие в первичной цепи трансформатора при работе ВПЧ.

На рисунке 5 приведены результаты моделирования входного тока и его гармонический состав. Из рисунка видно, что форма тока является практически синусоидальной. В спектре тока доминируют 5-я гармоника (0,66 %), 11-я гармоника (0,95 %), 13-я гармоника (0,65 %). Уровень остальных гармоник не превышает 0,5 %. Коэффициент искажения входного тока составляет 1,47 %. Следует отметить, что приведенные данные близки к экспериментальным данным, приведенным нами в [2].

По результатам моделирования и экспериментальным данным показано, что такие незначительные искажения тока, потребляемого из сети преобразователем, не при-

водят к существенному искажению кривой питающего напряжения и коэффициент искажения кривой напряжения и коэффициенты n -й гармонической составляющей напряжения не превышают норм, установленных ГОСТ 13109-97 [8].

Выводы:

1. Усовершенствована методика расчета параметров модели фазосдвигающего трансформатора, реализующего 36-пульсную схему выпрямления переменного напряжения, имеющего 18 вторичных обмоток, соединяемых по схеме «треугольник-авто». На основе теоремы синусов получены выражения для расчета напряжений на основных и дополнительных частях вторичных обмоток.

2. В пакете Matlab / Simulink разработана компьютерная модель фазосдвигающего трансформатора, содержащая три блока «Multiwinding transformer», каждый из которых на вторичной стороне содержит 36 индуктивно связанных элементов, образующих 18 обмоток, соединенных по схеме «треугольник-авто».

3. На основании результатов моделирования показано, что в спектре гармоник входного тока максимальные амплитуды гармоник не превышают 1%, а коэффициент искажения синусоидальности не превышает 2 %, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

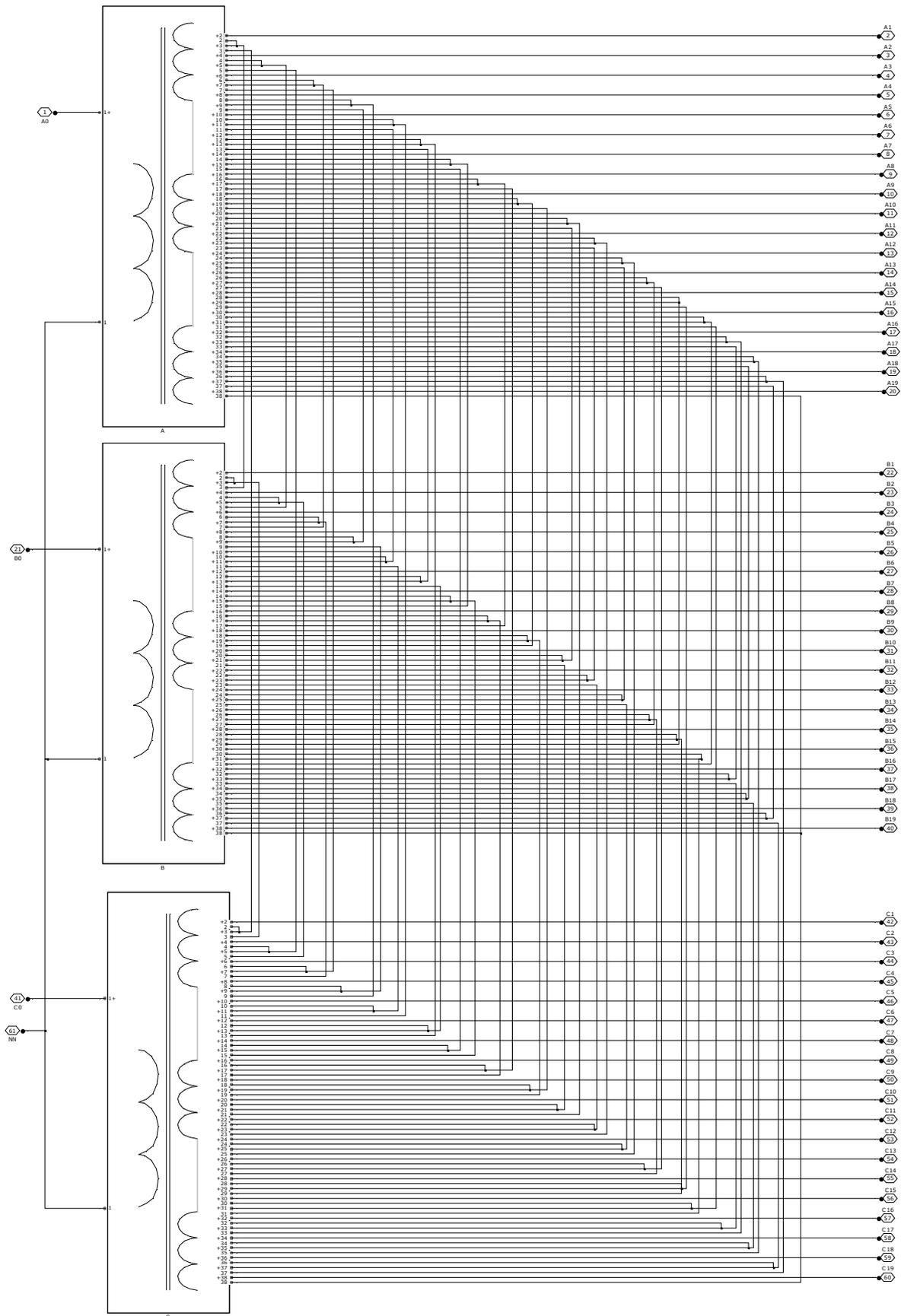


Рисунок 4 – Структурная схема модели фазосдвигающего трансформатора

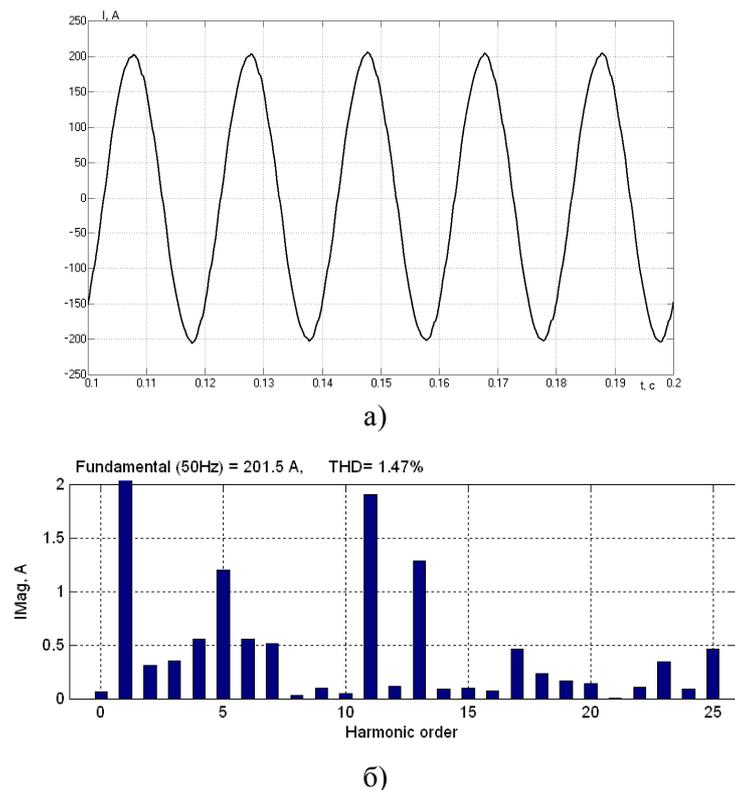


Рисунок 5 – Результаты моделирования тока, потребляемого из сети при работе ВПЧ:
а)- график входного тока; б)- спектр гармоник

Библиографический список

1. Донской Н. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики / Н. Донской, А. Иванов, В. Матисон, И. Ушаков // *Силовая электроника*. – 2008. – № 1. – С. 43–46.
2. Кухарев А.Л. Разработка и испытание высоковольтного преобразователя частоты / Кухарев А.Л. // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. – 2012. – №37. - С. 297–306.
3. Фишлер Я.Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я.Л. Фишлер, Р.Н. Урманов, Л.М. Пестряева. – М.: Энергоатомиздат, 1989.– 320 с.
4. Gupta R.A. Performance analysis of 18-pulse ac-dc converter fed vector controlled induction motor drive / R.A.Gupta, R. Kumar, B. Bhushan // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2008. – Vol.4. – №.1. – P. 861–873.
5. Sapin A. Modeling of Multi-Winding Phase Shifting Transformers / A. Sapin, P. Allenbach, J. J. Simond [Электронный ресурс]: *Applications to DC Supplies. ICEM 200. Helsinki, Finland August 28-30, 2002*. – Режим доступа: http://infoscience.epfl.ch/record/133173/files/PCIM_momwpstatdamlvs.pdf?version=1.
6. Seixas, F. J. Novo Conversor CA-CC Trifásico Isolado de 12kW / F.J.M. Seixas, B. Ivo // *III Congresso Internacional de Infra-estrutura para Telecomunicações (CININTEL 2000), Florianópolis. 2000*. – №. 1. – P. 287-296.
7. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л. В. Лейтес. – М.: Энергия, 1981. - 392 с.
8. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - Введ. 18.06.1999. - К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Луциком В.Д.

