

УДК 621.313.333

**АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПРЯЖЕНИЯ
ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЧАСТОТНО - РЕГУЛИРУЕМОГО
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Бабакин В.И.¹, Ивашкин О.Н.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа
e-mail: ¹valerybabakin@mail.ru*

***Аннотация.** Представлена модель частотно–регулируемого электропривода магистрального насоса с мощным высоковольтным асинхронным двигателем в пакете Sim Power Systems. С помощью модели произведен сравнительный анализ влияния частотно–регулируемых электроприводов с различным числом фаз на гармонический состав напряжения питающей сети.*

***Ключевые слова:** электропривод, преобразователь частоты, магистральный насос, гармонический состав, осциллограмма, число фаз*

Технологические процессы транспорта углеводородного сырья характеризуются высокой энергоёмкостью. В подавляющем большинстве случаев электроприводы технологических установок транспорта углеводородного сырья являются нерегулируемыми, что не обеспечивает режим рационального электропотребления. Выбранные по максимуму производительности рабочие машины этих установок могут значительную часть времени работать с нагрузкой меньшей, чем номинальная и, как следствие, с превышением удельного расхода энергии на транспорт перекачиваемого сырья.

При использовании частотно-регулируемого электропривода может быть достигнута значительная экономия электроэнергии. При этом энергосберегающий эффект будет тем выше, чем больше неравномерность графика потребления нефти и нефтепродуктов. Помимо энергосбережения применение частотно-регулируемого электропривода обеспечивает ресурсосберегающий эффект за счёт уменьшения утечек перекачиваемого вещества через уплотнения, увеличения межремонтных периодов перекачивающих агрегатов и запорной арматуры, функционирующих в щадящих режимах, а также значительно более точное соблюдение технологического режима.

Появление полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов (IGBT, GTO, IGCT) с высокими значениями параметров привело к радикальным изменениям в схемотехнике устройств силовой электроники, что позволило создавать частотно-регулируемые электроприводы большой мощности. Появились объективные возможности создания малогабаритных, простых и надёжных в эксплуатации преобразователей с высокими энергетическими показателями [1].

Прогресс в области силовой преобразовательной техники привёл к широкому внедрению вентильных преобразователей, которые потребляют из сети ток несинусоидальной формы, и в результате возникают нелинейные искажения напряжения сети. Эти искажения неблагоприятно сказываются на работе силового электрооборудования, систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Возникающие в результате воздействия высших гармоник экономические ущербы обусловлены, главным образом, ухудшением энергетических показателей, снижением надёжности электрических сетей и сокращением срока службы электрооборудования [2, 3].

Отклонение формы напряжения питающей сети от идеальной синусоиды является нежелательным в электрической сети и допустимо лишь в определённых пределах. Качество электроэнергии регламентирует ГОСТ 13109–97 «Качество электрической энергии. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Нормы качества электроэнергии, устанавливаемые настоящим стандартом, являются уровнями электромагнитной совместимости для кондуктивных электромагнитных помех в системах электроснабжения общего назначения.

Наибольшее применение для регулирования частоты вращения высоковольтных асинхронных двигателей получили двухзвенные высоковольтные преобразователи частоты (ВПЧ). Варианты непосредственного подключения ВПЧ к статору высоковольтного двигателя приведены на рис. 1.

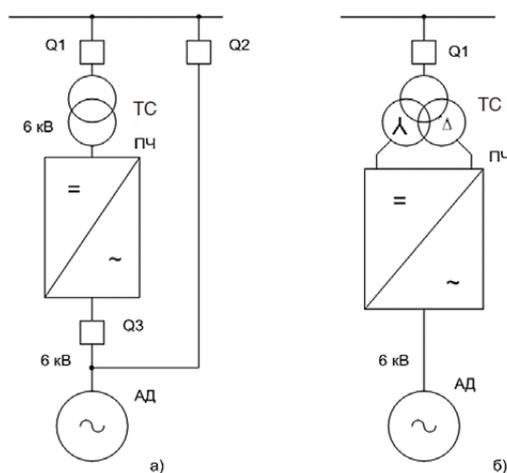


Рис. 1. Применение в асинхронном электроприводе высоковольтного преобразователя частоты:

- а – схема подключения к сети двухуровневого преобразователя частоты;
- б – схема подключения к сети трехуровневого преобразователя частоты

Электромагнитная совместимость (ЭМС) ВПЧ с сетью электроснабжения обеспечивается либо традиционными способами – увеличением эквивалентной

фазности (пульсности) сетевого выпрямителя, либо искусственным повышением мощности короткого замыкания в точке присоединения ВПЧ [4, 5, 6, 7].

Для анализа влияния высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода с автономным инвертором с различным числом фаз на питающую электрическую сеть в работе используется модель электроснабжения в пакете SimPowerSystems.

На рис. 2 приведена модель электроснабжения высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода, (ВПЧ состоит из 6-пульсного выпрямителя и двухуровневого АИН), соответствующая варианту подключения ВПЧ (рис. 1а)

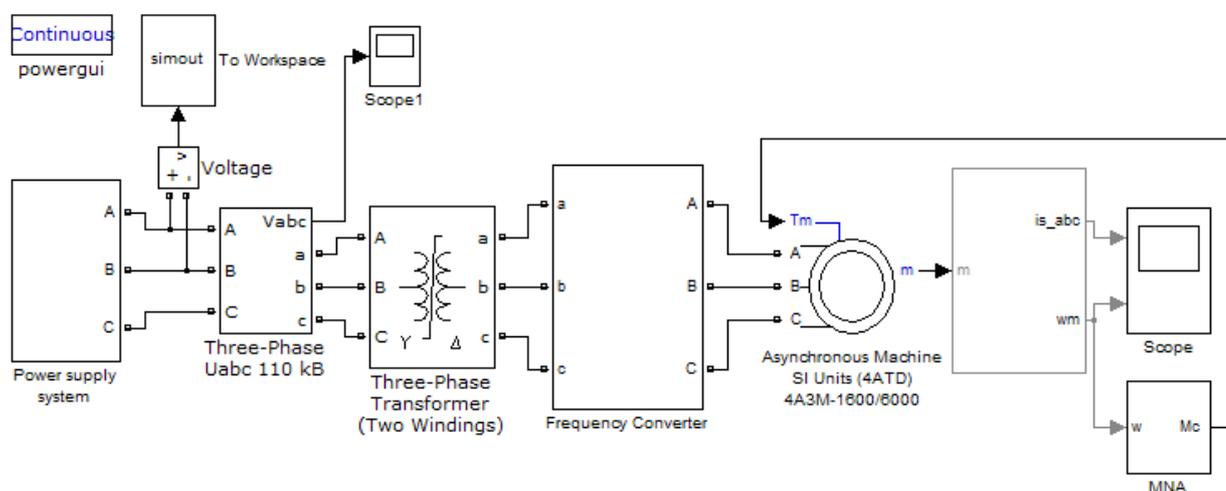


Рис. 2. Модель электроснабжения высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода

Система электроснабжения представляет собой сложный электротехнический комплекс, модель которого построена с использованием стандартных блоков MATLAB и с использованием трёх подсистем (Power supply system, Frequency Converter и MNA).

Роль источника электрической энергии в модели выполняет источник трёхфазного напряжения (Three-Phase Source) (рис. 3). От него по воздушной линии электропередачи получает питание трансформатор главной понизительной подстанции (ГПП).

Подсистема Frequency Converter, представленная на рис. 4, является моделью ВПЧ, состоящего из 6-пульсного выпрямителя и двухуровневого АИН. Подсистема Frequency Converter содержит также многорезонансный сглаживающий фильтр и блок Subsystem.

Для управления инвертором используется подсистема Subsystem, формирующая трёхфазную симметричную систему напряжений.

Модель системы управления инвертором представлена на рис. 5.

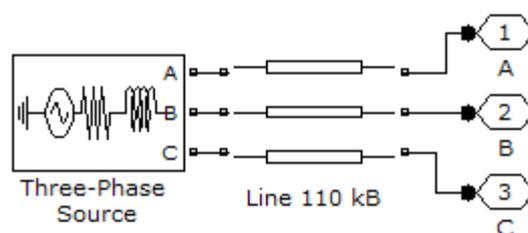


Рис. 3. Подсистема Power supply system.

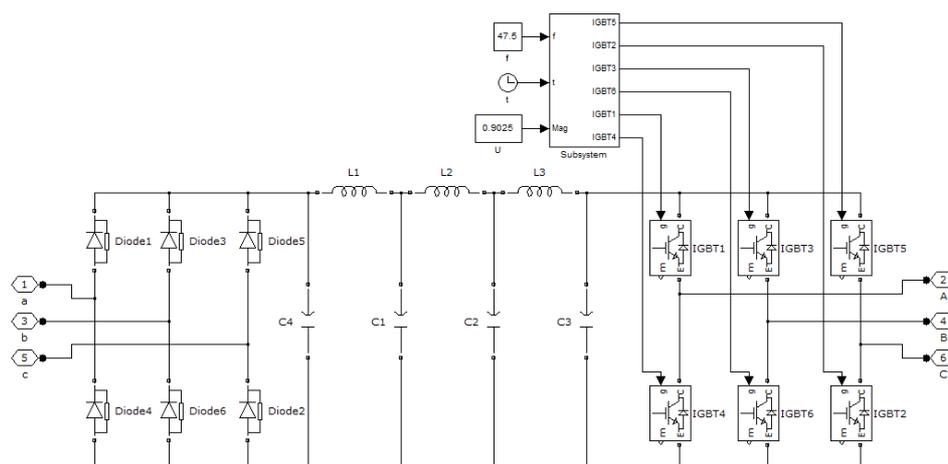


Рис. 4. Подсистема Frequency Converter.

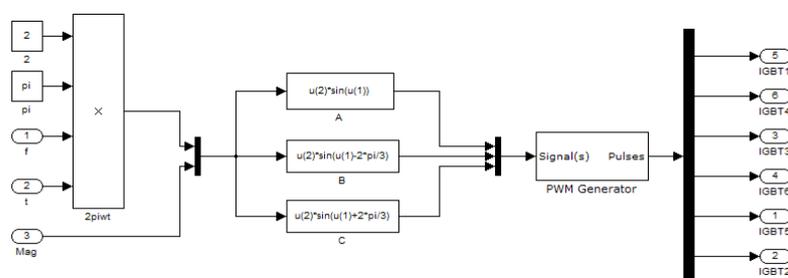


Рис. 5. Подсистема Subsystem.

Нагрузкой электропривода является магистральный насос, имеющий сменный ротор, рассчитанный на подачу $1,25 \cdot Q_{ном}$. Рабочий участок механической характеристики магистрального насосного агрегата может быть описан выражением [7, 8]:

$$M_c = M_{c0} + (M_{cном} - M_{c0}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2,$$

где: M_{c0} – момент сопротивления насоса в момент запуска, Н·м;

$M_{cном}$ – номинальный момент сопротивления насоса, Н·м,

$\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость, рад/с.

Выражение для момента сопротивления, Н·м, насоса через его рабочие параметры, при номинальной скорости вращения [8]:

$$M_{c \text{ ном}} = 9,565 \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta \cdot n},$$

где: ρ – плотность перекачиваемой нефти, кг/м³ ;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H – напор развиваемый насосом, м;

Q – подача насоса, м³/с;

η – КПД насоса,

n – частота вращения, об/мин.

При создании модели насоса НМ-1250-260 (рис. 6) принято $M_{c0} = 0,2 \cdot M_{c \text{ ном}}$ [12].

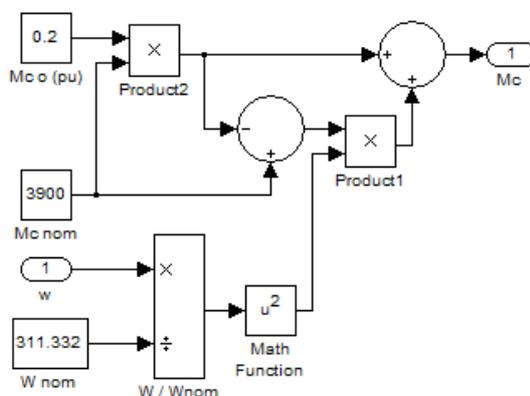


Рис. 6. Модель насоса НМ-1250-260 относительно момента сопротивления

На рис. 7 приведены осциллограммы токов трёхфазной обмотки статора двигателя и угловой скорости ротора, полученные с помощью осциллографа Scope. Осциллограммы рис. 7 отображают пусковой ток двигателя и разгон двигателя до установившейся угловой скорости.

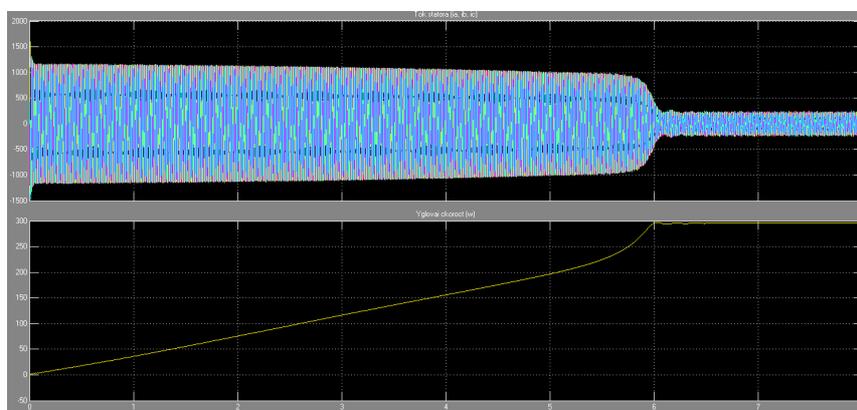


Рис. 7. Осциллограмма токов трёхфазной обмотки статора двигателя и угловой скорости ротора

Осциллограмма на рис. 8 иллюстрирует форму токов трёхфазной обмотки статора при питании двигателя от двухуровневого АИН.

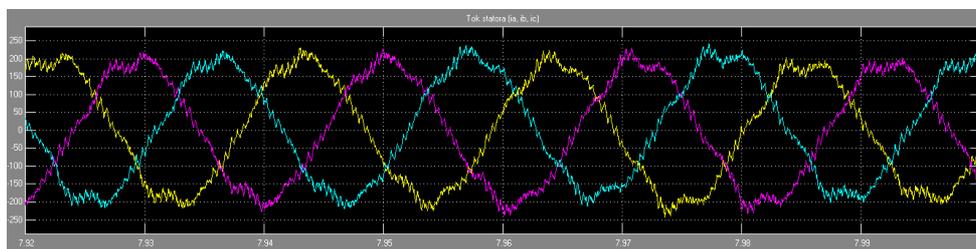


Рис. 8. Осциллограмма токов трёхфазной обмотки статора двигателя при вращении с постоянной скоростью

С помощью осциллографа Scope1 получена осциллограмма напряжений на вводах 110 кВ трансформатора ГПП (рис. 9).

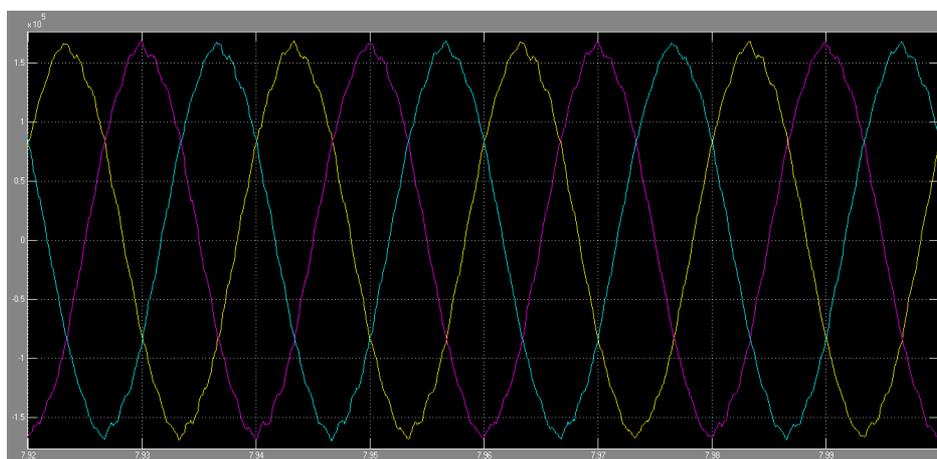


Рис. 9. Осциллограмма напряжений на вводах 110 кВ трансформатора

Для проведения анализа гармонического состава предусмотрено выведение исследуемого сигнала (напряжения между фазами А и В) в рабочую область MATLAB с помощью блока To Workspace. После окончания процесса расчёта модели в графическом интерфейсе пользователя Powergui выбирается функция FFT Analysis (быстрое преобразование Фурье), с помощью которой производится гармонический анализ исследуемого сигнала. Результаты этой процедуры приведены в виде гистограммы на рис. 10.

Для сетей 110 кВ ГОСТ 13109-97 устанавливает нормально допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения $K_U = 2\%$. Результаты моделирования показывают, что значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения (THD) превышает установленное ГОСТом нормально допустимое значение.

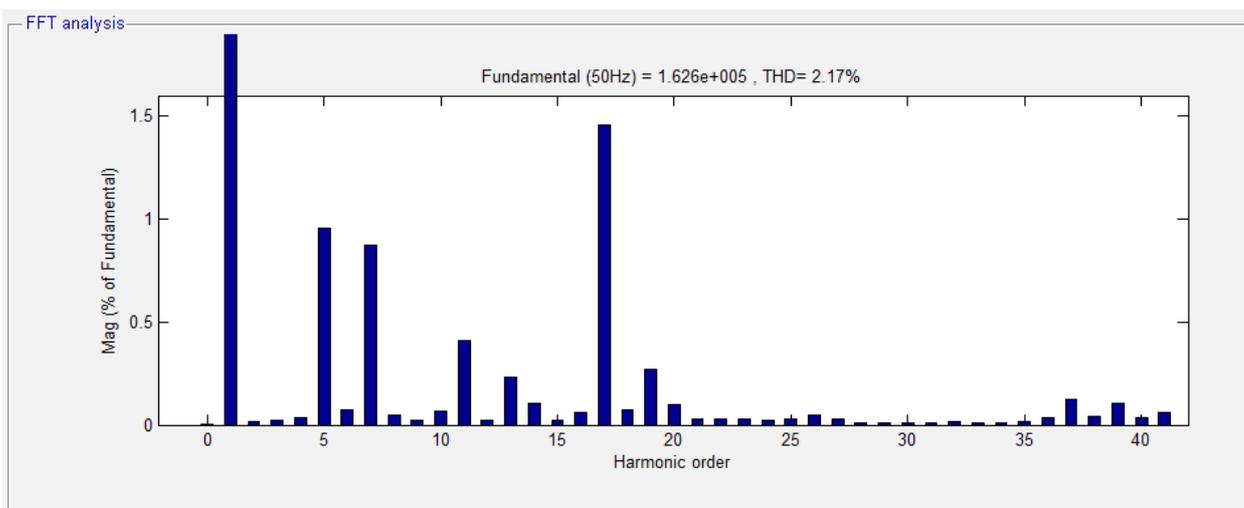


Рис. 10. Гармонический состав напряжения на вводе 110 кВ ГПП

Многофазные схемы обеспечивают взаимную компенсацию на шинах источника высших гармоник, не характерных для многофазного режима. Так, при 12-фазной схеме компенсируются 5, 7, 17 и 19-я высшие гармоники.

В большинстве случаев 12-фазный режим реализуется на базе двух одинаковых 6-фазных преобразователей при соединении одной обмотки трансформатора в звезду, другой – в треугольник [2, 3].

На рис. 11 приведена модель электроснабжения ВПЧ состоящего из 12-пульсного выпрямителя и трёхуровневого АИН, соответствующая схеме присоединения (рис. 1в), с помощью которой проводится оценка влияния увеличения эквивалентной фазности сетевого выпрямителя на значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения.

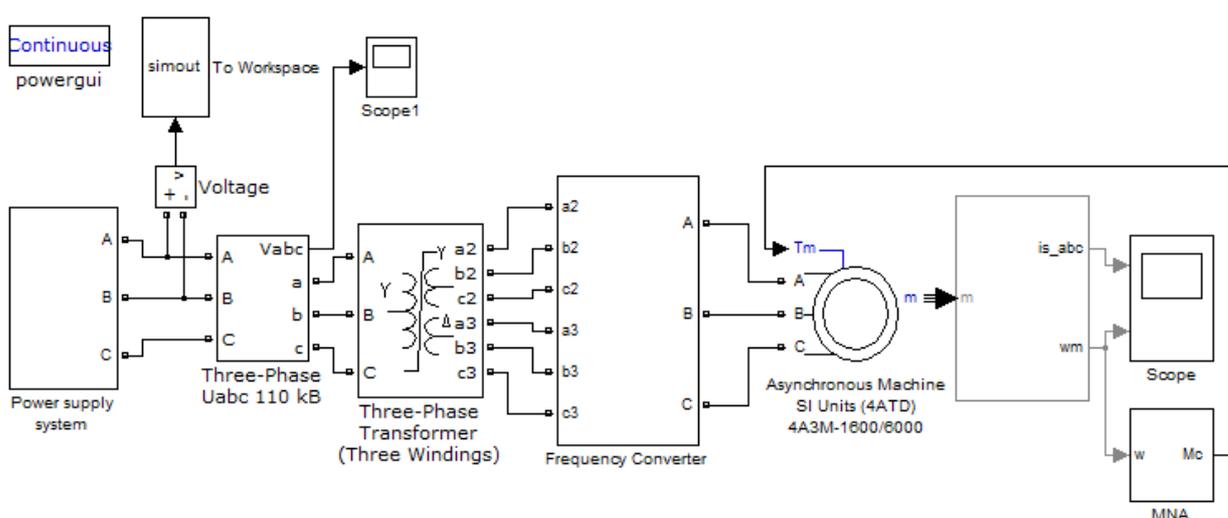


Рис.11. Модель электроснабжения высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода

Подсистемы Power supply system и MNA аналогичны соответствующим подсистемам рассмотренным в первой модели. Изменения коснулись подсистемы Frequency Converter.

Подсистема Frequency Converter, представленная на рис. 12, является моделью ВПЧ, состоящего из 12-пульсного выпрямителя и трёхуровневого АИН. Подсистема Frequency Converter содержит блок Subsystem.

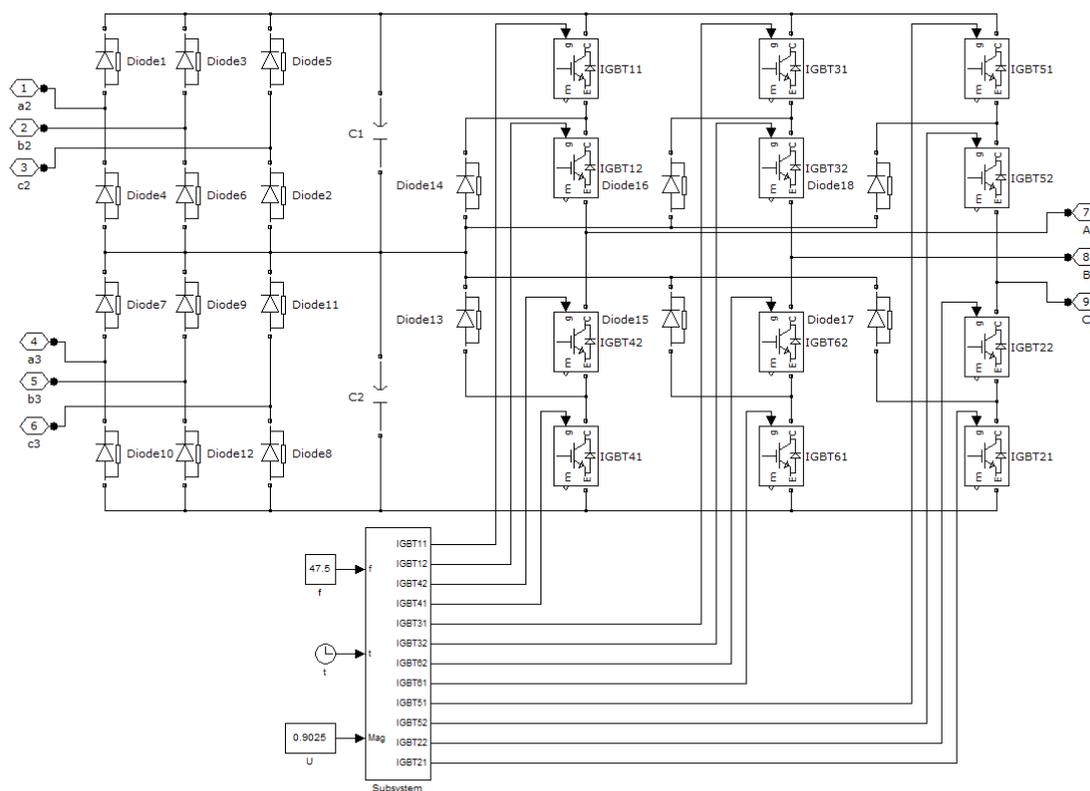


Рис. 12. Подсистема Frequency Converter.

Для управления инвертором используется подсистема Subsystem, формирующая трёхфазную симметричную систему напряжений (рис. 13).

На рис. 14 приведены осциллограммы токов трёхфазной обмотки статора двигателя и угловой скорости ротора, полученные с помощью осциллографа Scope.

Осциллограммы (рис. 15) отображают пусковой ток двигателя и разгон двигателя до установившейся угловой скорости.

С помощью осциллографа Scope1 получена осциллограмма напряжений на вводах 110 кВ трансформатора ГПП, представленная на рис. 16.

Результаты проведения анализа гармонического состава представлены на рис. 17.

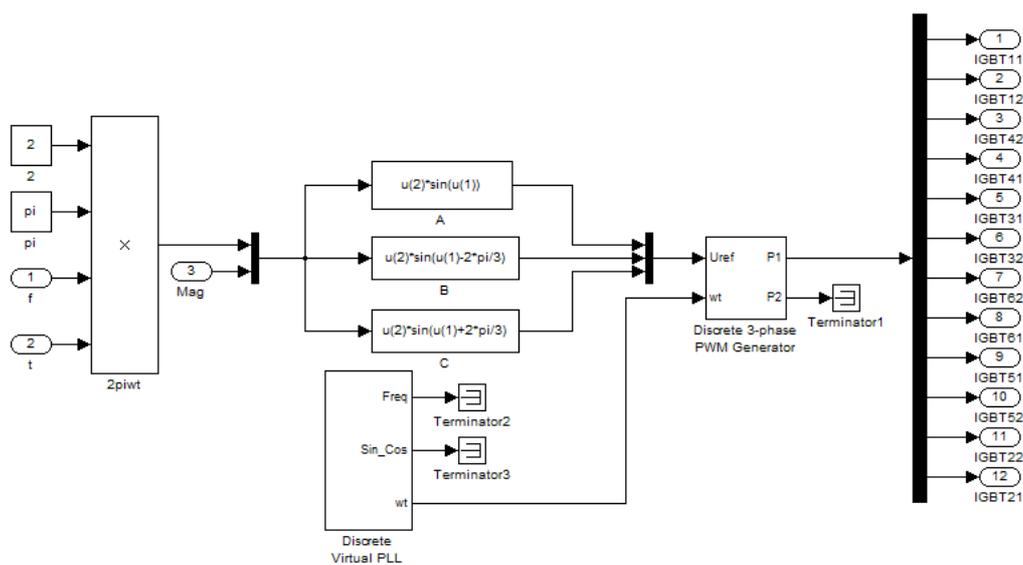


Рис. 13. Подсистема Subsystem

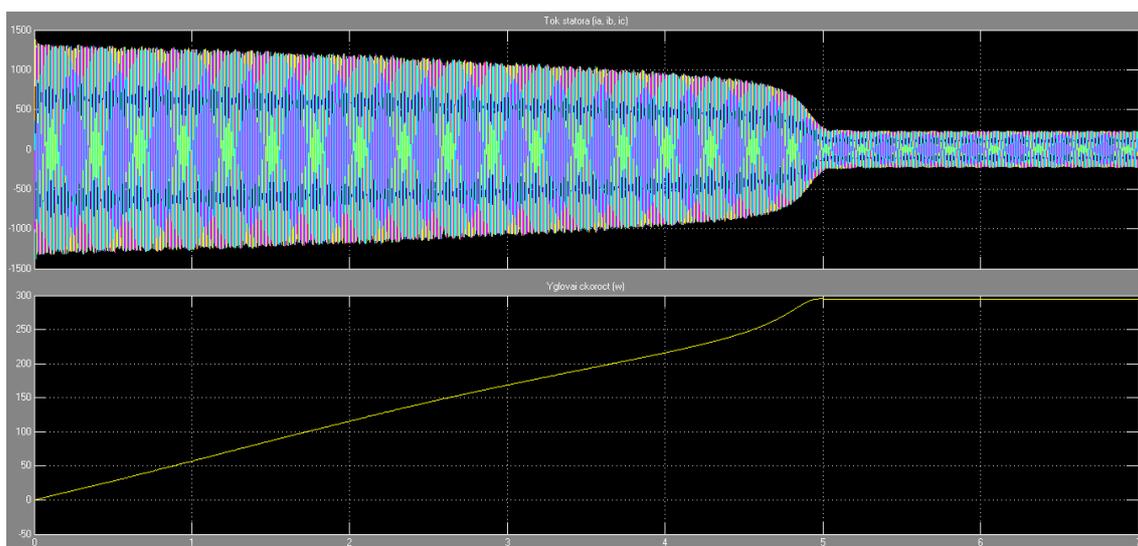


Рис. 14. Осциллограмма токов трёхфазной обмотки статора двигателя и угловой скорости ротора

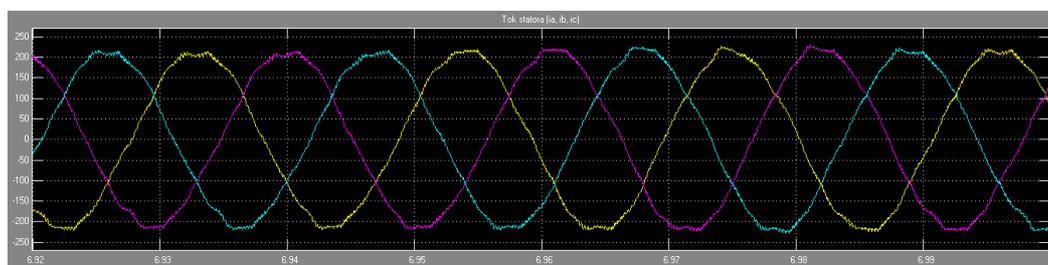


Рис. 15. Осциллограмма токов трёхфазной обмотки статора двигателя при вращении с постоянной скоростью

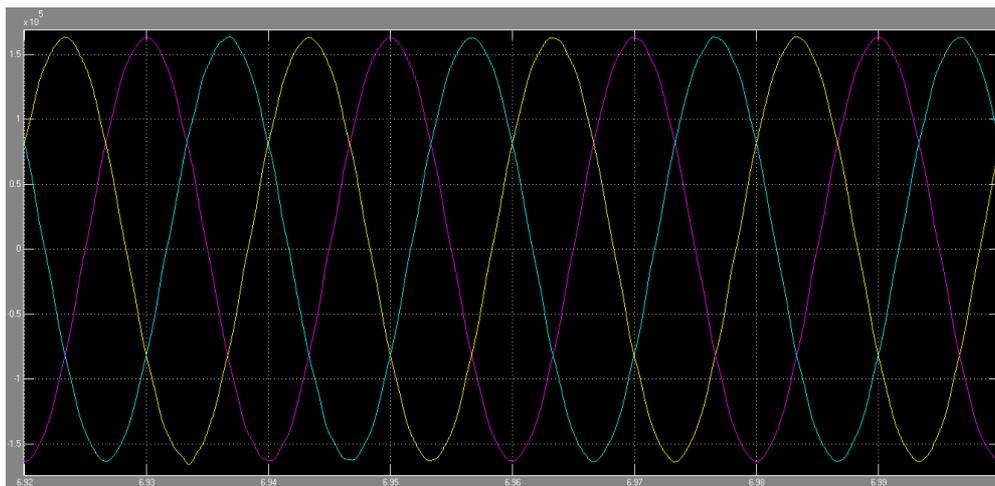


Рис. 16. Осциллограмма напряжений на вводах 110 кВ трансформатора

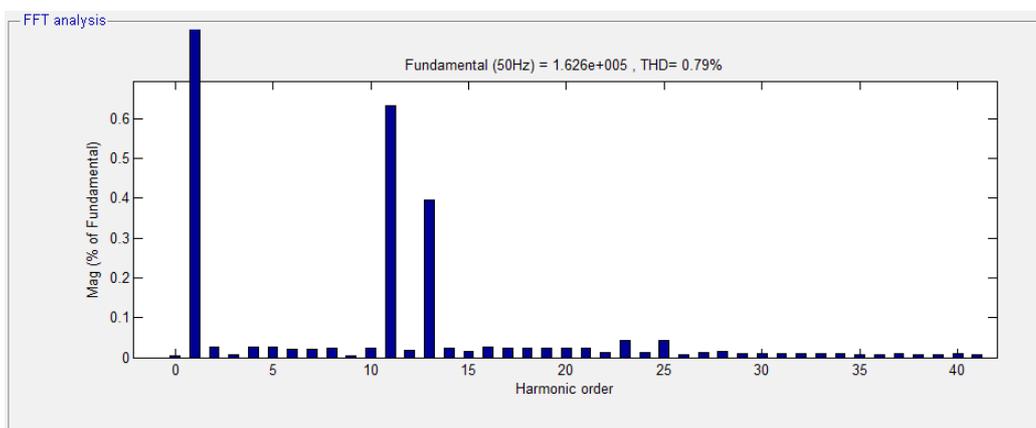


Рис. 17. Гармонический состав напряжения на вводе 110 кВ ГПП

Результаты моделирования показывают, что значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения (THD) не превышает установленное ГОСТом нормально допустимое значение.

Векторы 5-й гармоники образуют симметричную систему обратной последовательности; следовательно вращаются относительно векторов напряжения питающей системы с частотой, равной 6ω , где ω – круговая частота сети. Векторы 7-й гармоники образуют систему прямой последовательности и вращаются в ту же сторону, что и векторы напряжения питающей системы; частота вращения векторов тока гармоник относительно той же системы векторов напряжения также составит 6ω .

При соединении обмоток трансформатора в звезду и треугольник сдвиг по фазе между векторами напряжений составляет 30° , следовательно, векторы высших гармоник одноимённых фаз, сдвинутые на угол $30 \cdot 6 = 180^\circ$, окажутся в про-

тивофазе и будут взаимно компенсироваться на шинах подстанции. В равной мере это относится к 17-й и 19-й гармоникам [2].

Таким образом, увеличение пульсности с 6 до 12 позволяет снизить THD почти в 3 раза и тем самым существенно улучшить гармонический состав напряжения питающей сети.

Литература

1. Белоусенко И.В., Шварц Г.Р., Великий С.Н., Ершов М.С., Яризов А.Д. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности. М.: ООО «Недра–Бизнесцентр», 2007. 478 с. ил.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах промышленного электроснабжения промпредприятий; 4–е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с., ил.
3. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с., ил.
4. Лазарев Г.Б. Частотнорегулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок // Силовая электроника. 2007. № 3. С. 41 - 48.
5. Лазарев Г.Б. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем // Новости электротехники. 2005. № 2 (32). С. 30 - 36. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/10.php>
6. Лазарев Г.Б. Мощные высоковольтные преобразователи частоты для регулируемого электропривода в электроэнергетике // Электротехника. 2005. № 11. С. 1 - 9.
7. Лазарев Г.Б. Частотнорегулируемый электропривод – эффективная технология снижения расходов электроэнергии собственные нужды ТЭС // Главный энергетик. 2007. № 1. С. 11 - 12.
8. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с. ил.
9. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей: Под редакцией Л.Г. Миконянца: 4–е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с. ил.
10. Пронин М.В., Воронцов А.Г., Калачиков П.Н., Емельянов А.П. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчёт, применение). Под ред. Е.А. Крутикова. СПб.: Электросила, 2004. 252 с. ил.
11. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчёт). Под ред. Е.А. Крутикова. СПб.: Электросила, 2003. 172 с. ил.
12. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электрические установки и комплексы нефтегазовой промышленности: учеб. для вузов. М.: Недра, 2000. 487 с.

ANALYSIS OF THE SUPPLY-LINE VOLTAGE HARMONIC COMPOSITION OF THE HIGH-VOLTAGE FREQUENCY CONTROLLED ASYNCHRONOUS MOTOR

V.I. Babakin¹, O.N. Ivashkin
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
e-mail: ¹valerybabakin@mail.ru

Abstract. *The article presents the model of frequency controlled main pump electric drive with a powerful high-voltage asynchronous motor in the SimPowerSystems package. A comparative analysis of the influence of frequency controlled electric drives with different number of phases on the harmonic composition of the supply-line voltage has been performed with the help of this model.*

Keywords: *electric drive, frequency converter, main pump, harmonic composition, oscillogram, number of phases*

References

1. Belousenko I.V., Shvarts G.R., Velikii S.N., Ershov M.S., Yarizov A.D. *Novye tekhnologii i sovremennoe oborudovanie v elektroenergetike neftegazovoi promyshlennosti* (New technologies and modern equipment in electrical power plants of oil and gas industry). Moscow, Nedra-Biznestsentr, 2007. 478 p.
2. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektro-snabzheniya prompredpriyatii* (Higher harmonics in power supply systems of industrial plants). 4 ed. Moscow, Energoatomizdat, 2000. 331 p.
3. Arrillaga Dzh., Bredli D., Bodzher P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh* (Harmonics in electrical systems). Moscow, Energoatomizdat, 1990. 320 p.
4. Lazarev G.B. *Chastotnereguliruemiyi elektroprivod nasosnykh i ventilyatornykh ustanovok* (Frequency-controlled drives of electric pump and fan systems), *Silovaya elektronika*, 2007, Issue 3, pp. 41 - 48.
5. Lazarev G.B. *Vysokovol'tnyye preobrazovateli dlya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda. Postroenie razlichnykh sistem* (High-voltage converters for variable-frequency drive. Construction of the different systems). *Novosti elektrotekhniki*, 2005, Issue 2(32), pp. 30-36. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/10.php>
6. Lazarev G.B. *Moshchnyye vysokovol'tnyye preobrazovateli chastoty dlya reguliruemogo elektroprivoda v elektroenergetike* (Powerful high-voltage converters of frequency for the adjustable electric drive in electric power industry), *Elektrotekhnika*, 2005, Issue 11. C. 1 - 9.
7. Lazarev G.B. *Chastotnereguliruemiyi elektroprivod – effektivnaya tekhnologiya snizheniya raskhodov elektroenergii sobstvennyye nuzhdy TES* (Variable frequency electric drive – an efficient technology for thermal power plants to reduce costs of its own electricity needs), *Glavnyi energetik*, 2007, Issue 1, pp. 11 - 12.

8. Leznov B.S. Energoberezhenie i reguliruemyye elektroprivod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh (Energy saving and regulated electric drive in pumps and blower units.). Moscow, Energoatomizdat, 2006. 360 p.

9. Syromyatnikov I.A. Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei (Operating modes of asynchronous and synchronous motors). Ed.: L.G. Mikonyants. 4 ed. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 240 p.

10. Pronin M.V., Vorontsov A.G., Kalachikov P.N., Emel'yanov A.P. Elektroprivody i sistemy s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami (modelirovanie, raschet, primenenie) (Electric drives and systems with electric machines and semiconductor converters (simulation, calculation, application)). Ed.: E.A. Krutikov. SPb., Elektrosila, 2004. 252 p.

11. Pronin M.V., Vorontsov A.G. Silovye polnost'yu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet) (Fully-controlled power semiconductor converters (simulation and calculation)). Ed.: E.A. Krutikov. SPb., Elektrosila, 2003. 172 p.

12. Men'shov B.G., Ershov M.S., Yarizov A.D. Elektricheskie ustanovki i komplekсы neftegazovoi promyshlennosti: ucheb. dlya vuzov (Electrical installations and complexes of the oil and gas industry. Textbook). Moscow, Nedra, 2001. 487 p.