

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №6 (2016) <http://naukovedenie.ru/vol8-6.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/122TVN616.pdf>

Статья опубликована 31.01.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Гостев В.В. Апробация инверторной системы компенсации формы кривой напряжения с помощью имитационной модели // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №6 (2016)

<http://naukovedenie.ru/PDF/122TVN616.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 62

Гостев Владимир Владимирович

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, Липецк¹

Ассистент кафедры «Электрооборудования»

E-mail: jordan234523@yandex.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=671915

Апробация инверторной системы компенсации формы кривой напряжения с помощью имитационной модели

Аннотация. В статье рассмотрен являющийся актуальным вопрос по обеспечению эффективной защиты систем электроснабжения металлургических предприятий от основных возмущающих факторов: высших гармонических составляющих напряжения (несинусоидальности напряжения), перенапряжений (внешних и внутренних), колебаний напряжения и колебания частоты и т.д. В зарубежной и отечественной литературе в настоящее время нет описания единой комплексной системы, которая обеспечивала бы эффективную защиту систем электроснабжения от высших гармоник любого порядка и амплитуды.

В данной работе произведена апробация разработанной автором инверторной системы компенсации формы кривой напряжения при помощи имитационной модели, созданной на базе пакетного приложения Simulink математической матричной лаборатории MATLAB. В результате исследования были получены осциллограммы электротехнических процессов, протекающих в разработанной системе. Анализ осциллограмм позволил сделать вывод, что созданная автором инверторная система компенсации формы кривой напряжения продемонстрировала свою работоспособность независимо от формы входного сигнала. Так же автором был проведен количественный анализ - расчет коэффициента несинусоидальности напряжения, который показал, что эффективность компенсации формы кривой напряжения возрастает с увеличением частоты высших гармонических составляющих.

Проведенный анализ эффективности функционирования разработанной инверторной системы компенсации формы кривой напряжения в зависимости от изменения параметров системы показал, что наибольшее влияние на компенсацию формы кривой напряжения оказывает точный расчет сопротивлений ветвей и высокая добротность резонансных LC-контуров. Апробация имитационной модели инверторной системы компенсации формы кривой напряжения позволила получить эмпирические зависимости эффективности функционирования инверторной системы компенсации от параметров процесса и системы.

¹ 398600, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30

Ключевые слова: инверторная система компенсации формы кривой напряжения; возмущающие факторы; высшие гармонические составляющие; имитационная модель; коэффициент несинусоидальности; коэффициент пропускания

Создание инновационных энергоэффективных технологий является одной из стратегических задач государственной энергетической политики России. Несмотря на это, наблюдается неудовлетворительная ситуация в оснащении металлургических предприятий высокоэффективным оборудованием, позволяющим обеспечивать необходимое качество электроэнергии [5]. Следовательно, остро стоит вопрос по обеспечению эффективной защиты систем электроснабжения металлургических предприятий от основных возмущающих факторов: высших гармонических составляющих напряжения (несинусоидальности напряжения), перенапряжений (внешних и внутренних), колебаний напряжения и колебания частоты и т.д.

В настоящее время не существует единой комплексной системы, которая обеспечивала бы эффективную защиту систем электроснабжения от высших гармоник любого порядка и амплитуды [4]. Таким образом, создание системы компенсации формы кривой напряжения для систем электроснабжения металлургических предприятий является на текущий момент времени весьма актуальным.

Целью данной работы является апробация разработанной автором инверторной системы компенсации формы кривой напряжения при помощи имитационной модели. Основными вопросами исследования являются оценка функционирования и оценка эффективности работы созданной системы при различных параметрах возмущающих факторов.

Для исследования процессов, происходящих в разработанной автором инверторной системе компенсации формы кривой напряжения, целесообразнее всего прибегнуть к помощи имитационной модели (рис. 1), созданной на базе пакетного приложения Simulink математической матричной лаборатории MATLAB. С этой целью необходимо задаться параметрами системы и начальными параметрами процесса [8].

Параметры системы зададим в виде передаточной функции каждой ветви инверторной системы компенсации формы кривой напряжения. Параметры процесса будут заданы с помощью питающего напряжения. В этой модели модули Sine Wave, Sine Wave1 и Sine Wave2 задают форму тока на входе в инверторную систему компенсации формы кривой напряжения. При этом модули Sine Wave, Fcn и Saturation, приближают форму питающего напряжения к реальной, наблюдаемой на практике, и представляют собой полезный сигнал, а модули Sine Wave1 и Sine Wave2 являются источниками высших гармонических составляющих, параметры которых (амплитуду, частоту, фазовый сдвиг) можно настроить относительно питающего напряжения [3]. Все эти три сигнала суммируются, и общий сигнал идет непосредственно к инверторной системе.

Модули Scope1 и To File, подключенные через блок Zero-Order Hold, позволяют снять осциллограмму питающего напряжения после сумматора и сохранить ее в виде, пригодном для дальнейшего использования и обработки.

Для проверки работоспособности системы проанализируем, насколько эффективно она будет гасить высшие гармонические составляющие тока и напряжения различного порядка. С этой целью на вход инверторной системы компенсации формы кривой напряжения подадим питающее напряжение, содержащее наиболее часто встречающиеся в металлургическом производстве высшие гармонические составляющие, оказывающие сильное негативное воздействие [6, 7].

В первом случае рассмотрим действие модели на 5-ую и 7-ую гармоники. Для большей наглядности зададим амплитуды гармонических составляющих на уровне 10% от амплитуды питающего сигнала. Осциллограмма тока на входе в инверторную систему компенсации формы кривой напряжения, получена с помощью модулей Scope1, Zero-Order Hold и To File (рис. 2 а). Обработав данные с выхода системы при помощи модулей Scope2, Zero-Order Hold и To File1 [9], получим осциллограмму напряжения после компенсации гармонических составляющих (рис. 2 б).

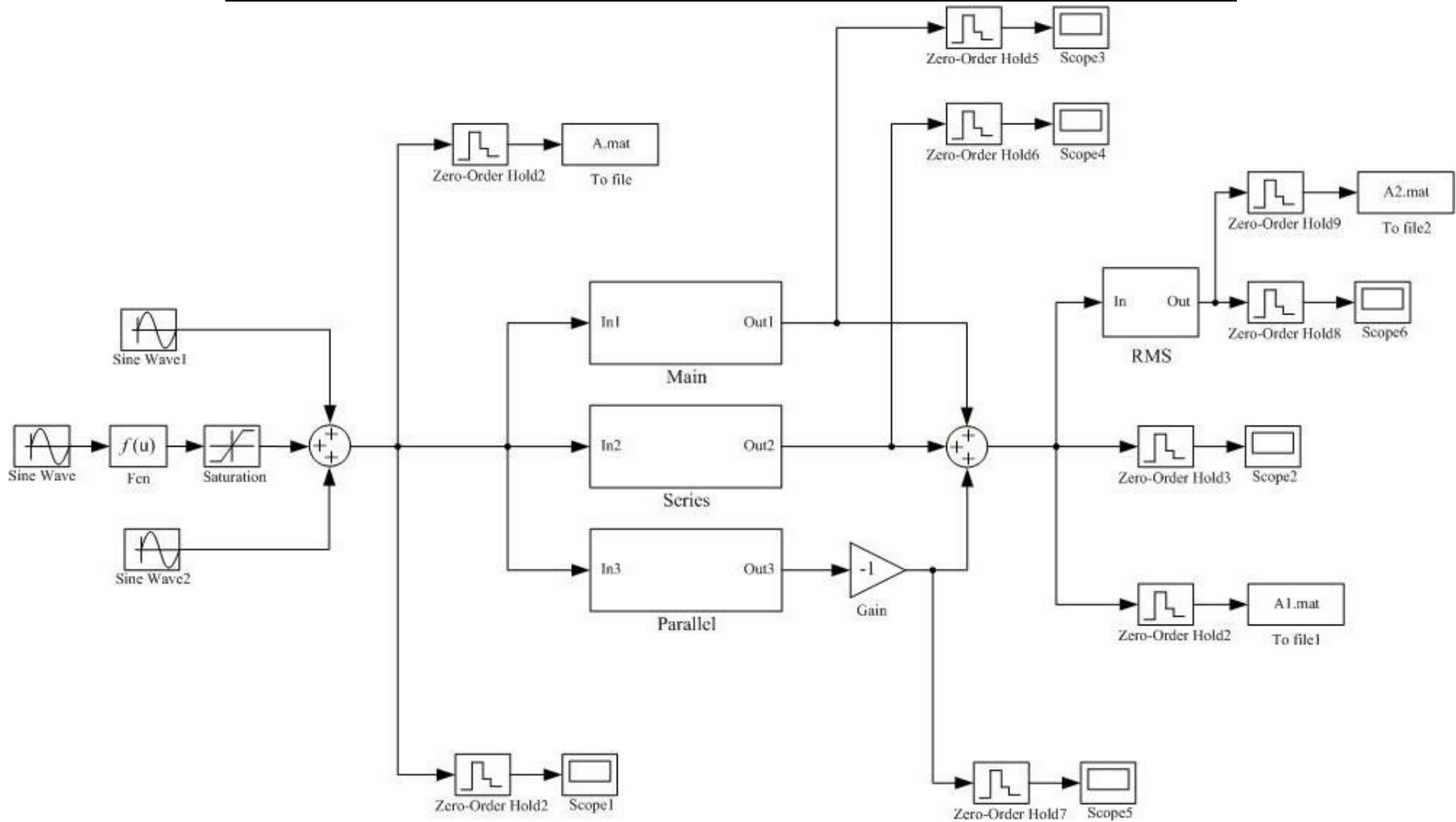


Рисунок 1. Общая схема имитационной модели инверторной системы компенсации формы кривой напряжения, построенная в MATLAB (разработано автором)

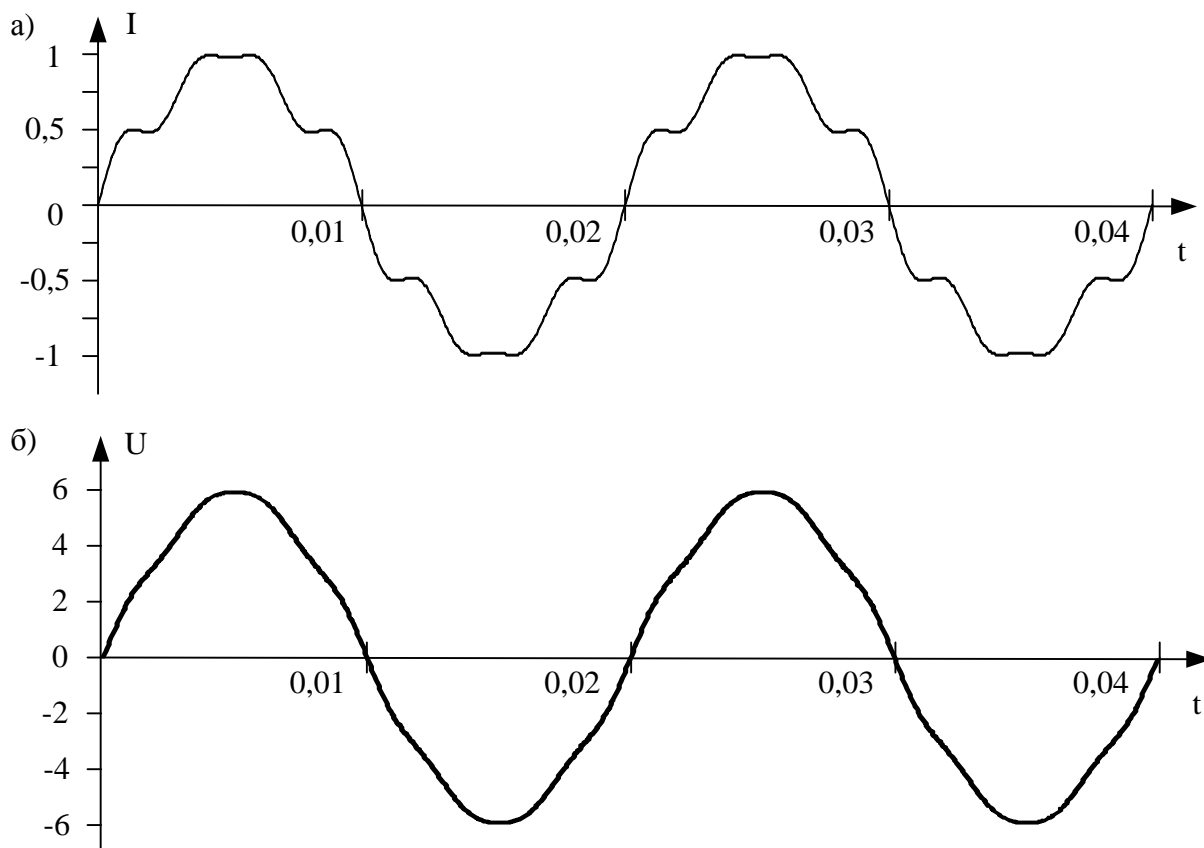


Рисунок 2. Кривые тока и напряжения, содержащие 5-ую и 7-ую гармоники: а) на входе в инверторную систему компенсации, б) на выходе инверторной системы компенсации (разработано автором)

Анализируя форму кривой напряжения на входе и выходе модели инверторной системы компенсации, можно сделать вывод об эффективности разработанной системы при компенсации высших гармонических составляющих небольшой кратности. Осциллограммы дают четко увидеть качественное изменение в форме кривой напряжения на выходе и приближении ее к чистой синусоиде, что свидетельствует об уменьшении коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения.

На следующем этапе рассмотрим действие модели на высшие гармонические составляющие более высокого порядка, например, на 15-ую и 17-ую гармоники. Для наглядности зададим амплитуды гармонических составляющих на уровне 10% от амплитуды питающего сигнала. Осциллограмма тока на входе в инверторную систему компенсации формы кривой напряжения, получена с помощью модулей Scope1, Zero-Order Hold и To File (рис. 3 а). Максимальная амплитуда тока равна единице.

После обработки данных с выхода системы при помощи модулей Scope2, Zero-Order Hold и To File1, получим осциллограмму напряжения после компенсации гармонических составляющих. Вид этой осциллограммы представлен на рис. 3 б.

На основе анализа формы кривой напряжения на входе и выходе модели инверторной системы компенсации, можно сделать вывод об эффективности разработанной системы при компенсации высших гармонических составляющих средней кратности.

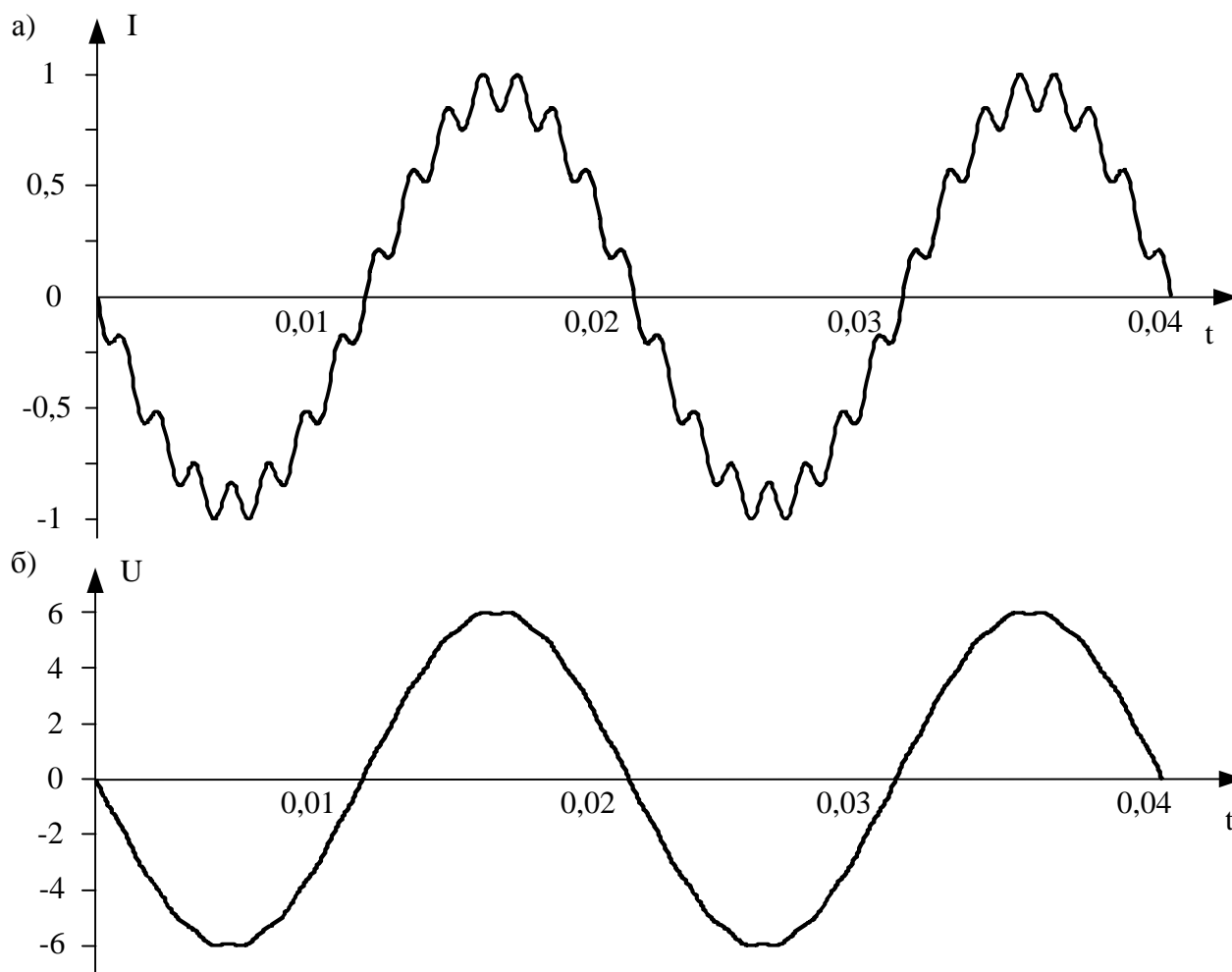


Рисунок 3. Кривые тока и напряжения, содержащие 15-ую и 17-ую гармоники: а) на входе в инверторную систему компенсации, б) на выходе инверторной системы компенсации (разработано автором)

Далее рассмотрим действие модели на высшие гармонические составляющие высокого порядка, такие как 33-ья и 37-ая гармоники. Для большей наглядности зададим амплитуды гармонических составляющих на уровне 10% от амплитуды питающего сигнала. Осциллограмма тока на входе в инверторную систему компенсации, будет иметь вид, показанный на рис. 4 а. Максимальная амплитуда тока равна единице. Обработав данные с выхода системы при помощи модулей Scope2, Zero-Order Hold и To File1, получим осциллограмму напряжения после компенсации гармонических составляющих. Вид этой осциллограммы представлен на рис. 4 б. Анализ формы кривой напряжения на входе и выходе модели инверторной системы компенсации позволяет сделать вывод об эффективности разработанной системы при компенсации высших гармонических составляющих высокой кратности.

Таким образом, становится очевидно, что разработанная система компенсации формы кривой напряжения, созданная для эффективного подавления негативного воздействия высших гармонических составляющих различного порядка, функционирует в соответствии со своим назначением. Модель подтвердила работоспособность разработанной автором инверторной системы при правильно рассчитанных параметрах процесса и системы.

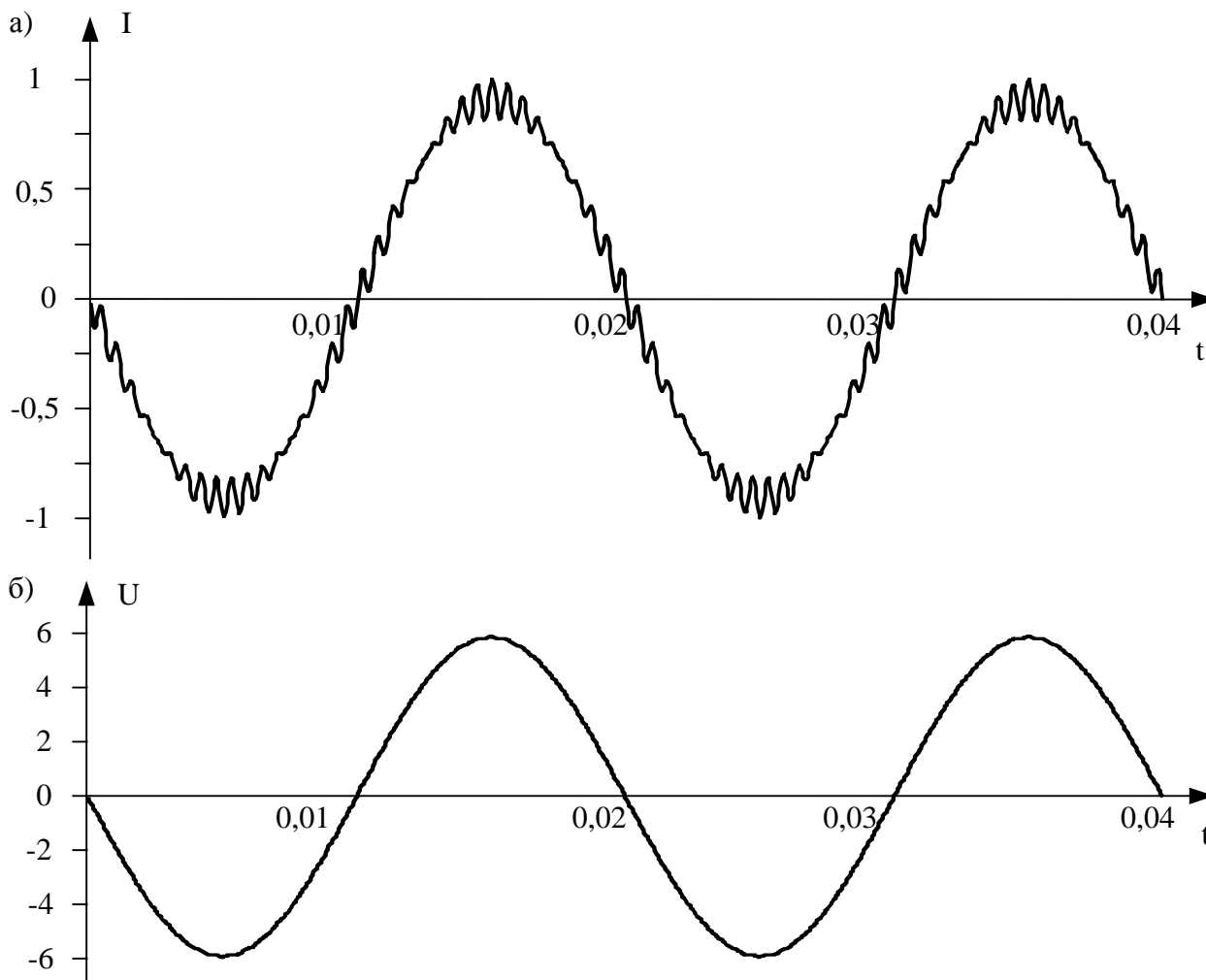


Рисунок 4. Кривые тока и напряжения, содержащие 33-ью и 37-ую гармоники: а) на входе в инверторную систему компенсации, б) на выходе инверторной системы компенсации (разработано автором)

Для более полного анализа работоспособности инверторной системы компенсации формы кривой напряжения необходимо помимо качественной ввести количественную оценку ее функционирования. В качестве таких количественных показателей могут выступать коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и спектральная характеристика коэффициента пропускания. Для оценки эффективности компенсации формы кривой напряжения воспользуемся коэффициентом несинусоидальности напряжения K_U , который определяется по формуле:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_n} \cdot 100$$

где: U_v , U_1 , - действующие значения v-ой и первой гармоник напряжения; n - значение гармоники напряжения, соответствующей нормируемому отклонению [10].

Результаты расчетов коэффициента несинусоидальности напряжения на входе и на выходе инверторной системы компенсации формы кривой напряжения, произведенных для трех случаев с разным составом высших гармонических составляющих в питающем напряжении, сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты расчетов коэффициента несинусоидальности напряжения

Номера высших гармонических составляющих, действующих в системе	5-ая и 7-ая	15-ая и 17-ая	33-ья и 37-ая
K_u на входе в систему	12,296	10,612	7,071
K_u на выходе из системы	0,683	0,357	0,112
Уменьшение несинусоидальности (отношение $K_{U_{вх}}$ к $K_{U_{вых}}$)	18,01	29,72	63,13

Разработано автором

Анализ результатов расчетов коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения позволяет сделать вывод о повышении эффективности компенсации формы кривой напряжения с ростом частоты гармонической составляющей тока и напряжения, что подтверждает исследования, сделанные на этапе проектирования принципиальной схемы инверторной системы компенсации формы кривой напряжения [2].

Построим зависимость коэффициента пропускания высших гармоник системы от их частоты. Это позволит осуществлять в дальнейшем точную настройку всех блоков инверторной системы компенсации формы кривой напряжения для повышения эффективности ее функционирования. Для осуществления этой цели воспользуемся модулем RMS [1], с помощью которого получим спектральные характеристики коэффициента пропускания высших гармонических составляющих инверторной системой компенсации формы кривой напряжения. Коэффициент пропускания гармонической составляющей представляет собой отношение сигнала гармоники на выходе инверторной системы компенсации формы кривой напряжения к его значению на входе [11]. Таким образом, он является безразмерной величиной и может изменяться от нуля до единицы.

Первую спектральную характеристику коэффициента пропускания инверторной системы компенсации формы кривой напряжения построим при соблюдении всех расчетных параметров системы, т.е. при настройке LC-цепочек в резонанс, высокой добротности контуров и правильно рассчитанных сопротивлениях ветвей, обеспечивающих разделение потока энергии на две равные части. Спектральная характеристика для этого случая представлена на рис. 5 а. Как видно из графика, при соблюдении всех расчетных параметров системы максимальный коэффициент пропускания соответствует 1-ой гармонике (50 Гц) и близок к единице. С ростом частоты коэффициент пропускания стремительно снижается. При частотах от 150 до 650 Гц, соответствующих высшим гармоническим составляющим с 3-ей по 13-ую, коэффициент пропускания составляет 0,1 - 0,04, что свидетельствует о компенсации гармоник в 10-25 раз. При частотах свыше 1500 Гц, что соответствует высшим гармоническим составляющим с 30-ой и выше, коэффициент пропускания составляет менее 0,014, что свидетельствует о компенсации гармоник в 71 раз.

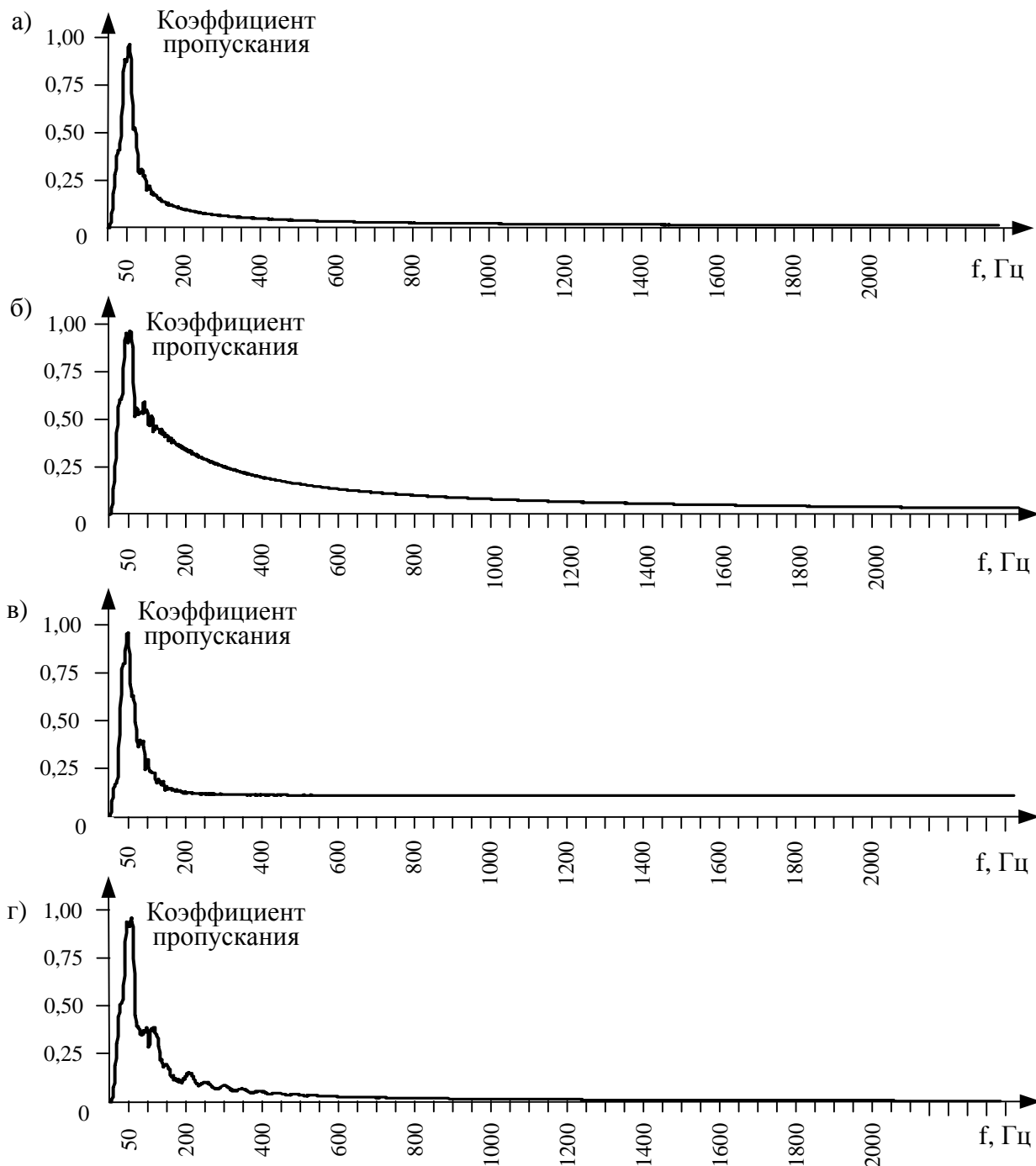


Рисунок 5. Спектральная характеристика инверторной системы компенсации формы кривой напряжения: а) при расчетных параметрах системы и процесса; б) при снижении добротности резонансных LC-контуров; в) при разности потоков электрической энергии через ветви (увеличение сопротивления ветви Main на 15%); г) при расстройке резонансных контуров (отклонение емкости от резонансной на 10%) (разработано автором)

Вторую спектральную характеристику коэффициента пропускания инверторной системы компенсации формы кривой напряжения построим при соблюдении всех расчетных параметров системы за исключением высокой добротности контуров (т.е. при более высоком сопротивлении LC-цепочек). Для этого повысим сопротивление LC-контура на 50%, соответственно добротность понизится в 1,5 раза. Спектральная характеристика для этого

случая представлена на рис. 5 б. По графику видно, что максимальный коэффициент пропускания, по-прежнему, соответствует 1-ой гармонике (50 Гц) и близок к единице. С ростом частоты коэффициент пропускания снижается, но это снижение не так интенсивно, как в первом случае. Очевидно, что при понижении добротности контуров в 1,5 раза, компенсирующий эффект инверторной системы снизился в 3-4 раза в зависимости от частоты гармоник.

Третью спектральную характеристику коэффициента пропускания инверторной системы компенсации формы кривой напряжения построим при соблюдении всех расчетных параметров системы за исключением правильно подобранных сопротивлений ветвей, обеспечивающих разделение потока энергии на две равные части. Для этого повысим сопротивление ветви Main на 15%, что перераспределит потоки энергии. Спектральная характеристика для этого случая представлена на рис. 5 в. Как видно из графика, при увеличении сопротивления ветви Main на 15%, компенсирующий эффект инверторной системы заметно ухудшается (снизился в 3-10 раз в зависимости от частоты гармоник).

Четвертую спектральную характеристику коэффициента пропускания инверторной системы компенсации формы кривой напряжения построим при соблюдении всех расчетных параметров системы за исключением правильной настройки LC-цепочки в резонанс. Для этого понизим емкость конденсаторной батареи на 10% от резонансного значения. Спектральная характеристика для этого случая представлена на рис. 5 г. По графику видно, что при расстройке резонансного контура, компенсирующий эффект инверторной системы снижается в 1,5-2 раза в зависимости от частоты гармоник.

Заключение

На основании исследований, проведенных в данной работе, можно сделать следующие выводы по работоспособности и эффективности функционирования разработанной инверторной системы компенсации:

1. Созданная автором инверторная система компенсации формы кривой напряжения продемонстрировала свою работоспособность независимо от формы входного сигнала, т.е. при любой частоте и амплитуде высших гармонических составляющих на входе в систему.

2. Помимо качественного анализа (осциллограммы выходных напряжений при различных параметрах процесса), был проведен количественный анализ - расчет коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, который подтвердил эффективность компенсации формы кривой напряжения. Данный расчет показал, что эффективность компенсации возрастает с ростом частоты высших гармонических составляющих.

3. Проведенный анализ эффективности функционирования разработанной инверторной системы компенсации формы кривой напряжения в зависимости от изменения параметров системы, позволил выявить те параметры, влияние которых на компенсацию формы кривой напряжения наиболее сильное. К ним можно отнести равенство сопротивлений ветвей, делящих потоки электроэнергии и высокую добротность резонансных LC-контуров. На основании этого можно сформулировать рекомендации для расчета блоков инверторной системы, которые будут отражать основные моменты, которым следует уделить особое внимание при проектировании.

4. Апробация имитационной модели инверторной системы компенсации формы кривой напряжения позволила получить эмпирические зависимости эффективности функционирования инверторной системы компенсации от параметров процесса и системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гостев В.В. Разработка основных блоков имитационной модели инверторной системы компенсации формы кривой напряжения // 2-ая Международная конференция с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах»: сборник тезисов докладов. - Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. - С. 73-75.
2. Гостев В.В. Имитационное моделирование инверторной системы компенсации формы кривой тока и напряжения // VII Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов и молодых ученых с международным участием «Вооружение. Технология. Безопасность. Управление»: сборник тезисов докладов. - Ковров: ФГБОУ ВПО «КГТА имени В.А. Дегтярева», 2014. - С. 357-362.
3. Гостев В.В., Шпиганович А.Н. Особенности моделирования систем динамического восстановления кратковременных нарушений электроснабжения // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2011, №4. С. 17-23.
4. Куро, Ж. Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении // Новости электротехники. - 2005. - №1, №2.
5. Фишман, В.С. Качество электроэнергии в руках проектировщика // Новости электротехники. - 2004. - №3.
6. Dugan, R.C. Electrical Power Systems Quality / R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, H.W. Beaty - McGraw-Hill, 1996. – 265 с.
7. Fiorina, J.N. Inverters and Harmonics / J.N Fiorina. - London: Cahier Technique Merlin Gerin, 1998. - 159 с.
8. Hunt, Briant R. A Guide to MATLAB / Briant R. Hunt, Ronald L. Lipsman, Jonathan M. Rosenberg. - New York: Cambridge University Press, 2003. - 346 с.
9. Karris, T. Steven. Signals and systems with MATLAB Applications / T. Steven Karris. - Fremont, California: Orchard Publications, 2004. - 598 с.
10. Kusko, A. Power Quality in Electrical Systems / A. Kusko, M.T. Thompson. - New York: McGraw-Hill, 2007. – 241 с.
11. Singh, M. Modeling Analysis and Solution of Power Quality Problems / M. Singh, V. Timary. - New York: McGraw-Hill, 2004. - 237 с.

Gostev Vladimir Vladimirovich
Lipetsk state technical university, Russia, Lipetsk
E-mail: jordan234523@yandex.ru

Approbation inverter compensation system voltage waveform by simulation model

Abstract. Considered is an actual question to ensure effective protection power-supply systems metallurgy industry for basic perturbing factors: higher voltage harmonics (voltage nonsinusoidality ratio), overstressing (outer and inside), voltage fluctuations and frequency oscillations. In foreign and domestic literature no description of a single integrated system that would ensure the effective protection of power-supply systems of the higher harmonics of any order and amplitude.

In this study, we carried out testing of the inverter compensation system voltage waveform developed by the author using a simulation model created on the basis of mathematical application package Simulink MATLAB matrix laboratory. The study was prepared by the waveform of electrical processes occurring in the developed system. Waveform analysis led to the conclusion that the author set up inverter compensation system voltage waveform has demonstrated its performance regardless of the input waveform. As the author conducted a quantitative analysis - the calculation of voltage nonsinusoidality ratio, which showed that the effectiveness of the compensation voltage waveform increases with the frequency of the higher harmonic components.

The analysis of the efficiency of the inverter compensation system voltage waveform depending on changes in the system parameters showed that the greatest impact on the compensation voltage waveform has an accurate calculation of the resistance branches and high quality factor resonance LC-circuits. Validation of the simulation model inverter compensation system voltage waveform yielded empirical relationships effectiveness of the inverter system of compensation of the process and system parameters.

Keywords: inverter compensation system voltage waveform; perturbing factors; higher harmonic; simulation model; voltage nonsinusoidality ratio; transmission factor