

## ТЕСТИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АКТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

БЕЛОВ В.Ф., д-р техн. наук, ПАЛЬДЯЕВ Н.Н.

Представлены результаты тестирования математических моделей активных электрических фильтров, подтверждающие их готовность для включения в базу математических моделей элементов комплекса программ *Emc-CAD* и применения в разработке вариантов систем фильтрации реактивных мощностей для автономных электроэнергетических систем.

*Ключевые слова:* тестирование, математическая модель, электрический фильтр, комплекс программ.

## TESTING MATHEMATICAL MODELS OF ELECTRICAL FILTERS FOR AUTONOMOUS ELECTRIC-POWER SYSTEMS

V.F. BELOV, Doctor of Engineering, N.N. PALDYAEV

The authors present testing results of mathematical models of active electrical filters which confirm their readiness to be included in mathematical models base of *EmcCAD* program system elements. They are also applicable in development of different reactive power filtration technologies for autonomous electric-power systems.

*Key words:* testing, mathematical model, electric filter, program system.

Основы автоматизации проектирования и математические модели активных электрических фильтров рассмотрены в [1–3]. Полученные результаты использованы для развития функциональных возможностей комплекса программ *Emc-CAD*, являющегося разработкой ООО «Предприятие СОФТРИД», реализуемой в целях повышения эффективности проектирования автономных электроэнергетических систем (АЭЭС) с устройствами энергетической электроники в своем составе.

Комплекс программ *Emc-CAD* содержит библиотеку базовых элементов, теоретические модели которых имеют стандартную форму представления, обеспечивающую их включение в математическую модель АЭЭС. Каждому обновлению библиотеки предшествует тестирование математических моделей новых базовых элементов.

Ниже рассматривается тестирование математических моделей встроенного активного электрического фильтра инвертора, активного фильтра с релейной системой управления, многофазного фильтра с многоступенчатой импульсной модуляцией для получения обоснованных заключений о границах их применения в составе базы математических моделей элементов системы *Emc-CAD*.

**Верификация комплекса программ *Emc-CAD*.** Верификация комплекса программ *Emc-CAD* необходима для обоснования правомерности его использования в качестве измерительного стенда при тестировании математических моделей активных фильтров. Для верификации выбрана наиболее простая схема АЭЭС, имеющая следующие характерные особенности:

– содержит полный набор элементов, применяемых в тестах, реализующих схемы АЭЭС с активными фильтрами;

– обеспечивает проверку достоверности отражения программой *Emc-CAD* электромагнитных процессов в АЭЭС при высокочастотных переключениях ключевых элементов;

– тестирует возможности нового алгоритма моделирования импульсных каскадных преобразователей электрической энергии, реализованного в *Emc-CAD*.

Изображения схемы АЭЭС с использованием графических элементов *Emc-CAD* и *MATLAB/Simulink* (далее для краткости просто *Simulink*) приведены соответственно на рис. 1, 2.

Схема АЭЭС содержит синхронный генератор *SG* с номинальной мощностью 1 кВт, напряжением 220 В, частотой 60 Гц и электронное оборудование с импульсным источником питания (*SMPS*) (рис. 3) номинальной мощностью 75 Вт. Распределительная сеть (*Power line*) имеет следующие параметры:  $R = 85,34$  мкОм и  $L = 0,54$  мкГн. Параметры сетевого провода (*Power cord*) импульсного источника питания:  $R = 4,6$  мОм и  $L = 0,216$  мкГн. Параметры синхронного генератора приведены в табл. 1.

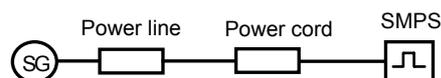


Рис. 1. Изображение АЭЭС в *Emc-CAD*

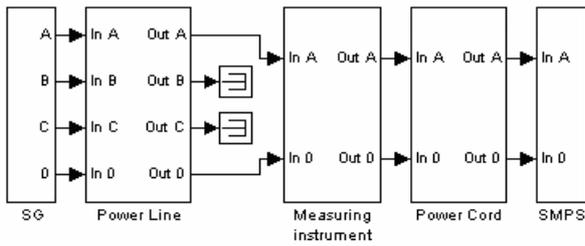


Рис. 2. Изображение АЭЭС в Simulink

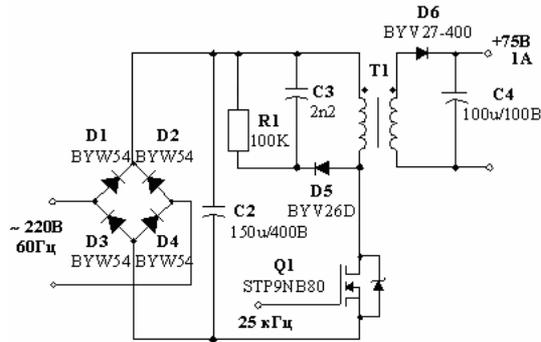


Рис. 3. Эквивалентная схема импульсного источника питания (SMPS)

Таблица 1. Параметры SG

Наименование	Значение
Активные сопротивления:	
статора	0,0105 о.е.
обмотки возбуждения	0,001936 о.е.
демпферной обмотки по оси d	0,0067 о.е.
демпферной обмотки по оси q	0,01 о.е.
Реактивные сопротивления:	
статора по оси d	1,94 о.е.
статора по оси q	1,94 о.е.
обмотки возбуждения	1,9365 о.е.
демпферной обмотки по оси d	1,8661 о.е.
демпферной обмотки по оси q	1,856 о.е.
Сопротивления взаимной индуктивности:	
по оси d	1,8335 о.е.
по оси q	1,8335 о.е.
Полная мощность	1000 ВА

Данные для сравнения генерируются в комплексе программ *Simulink*. В качестве контрольных параметров верификации выбраны напряжения, токи и показатели качества электрической энергии ПКЭ (коэффициент искажения  $K_u$ , коэффициент сдвига фаз  $K_c$ ) в узле подключения провода питания *SMPS* к линии электропередачи *Power line*. Результаты расчетов показаны в табл. 2 и на рис. 4, 5.

Таблица 2. Показатели качества электрической энергии

Программа \ ПКЭ	$K_u$	$K_c$
<i>Emc-CAD</i>	0,069952	0,678632
<i>Simulink</i>	0,069956	0,678626

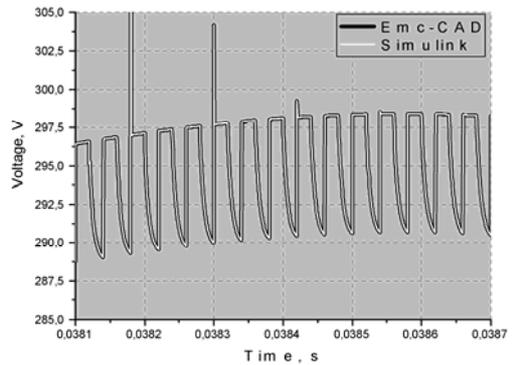
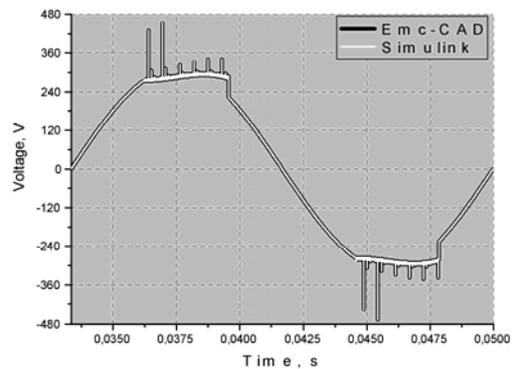


Рис. 4. Результаты расчетов напряжения в *Emc-CAD* и *Simulink* во временной области

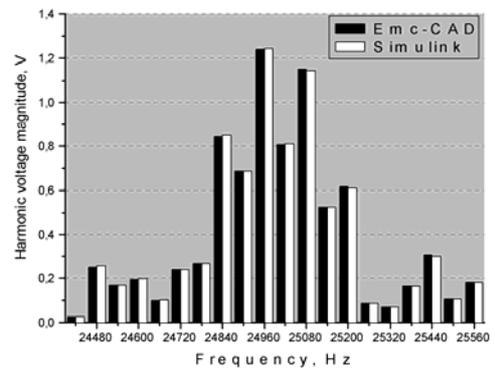
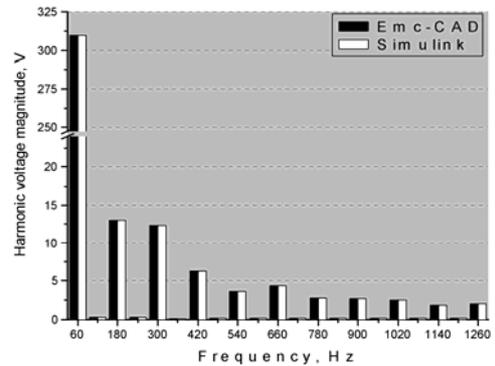


Рис. 5. Результаты расчетов напряжения в *Emc-CAD* и *Simulink* в частотной области

Сравнение спектров токов и напряжений, коэффициентов  $K_u$  и  $K_c$ , полученных в *Emc-CAD* и *Simulink*, показывает хорошее совпадение с эталоном. Таким образом, комплекс программ *Emc-CAD* может использоваться в качестве ис-

пытательного стенда для тестирования математических моделей новых базовых элементов.

**Тестирование математической модели встроенного активного фильтра инвертора.** Рассмотрим ветроэнергетическая систему, структурная схема которой приведена на рис. 6.

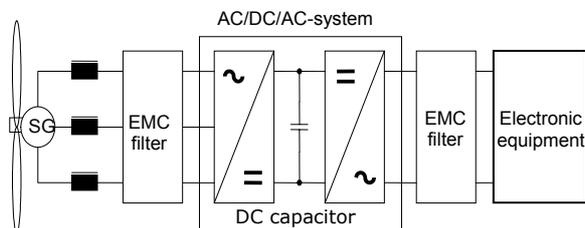


Рис. 6. Структурная схема ветроэнергетической системы

Синхронный генератор SG имеет номинальную мощность 1 кВт, номинальное напряжение 220 В и частоту 60 Гц.

Входным фильтром выпрямителя является симметричный трехфазный гармонический фильтр, состоящий из трех резонансных звеньев и параллельного конденсатора в каждой фазе. Параметры параллельного конденсатора следующие:  $R_p = 0,07$  Ом,  $C_p = 4,53577$  мкФ,  $L_p = 2,8648$  мГн. Параметры резонансного звена, настроенного на 5-ю гармонику (300 Гц):  $R_5 = 2,68386$  Ом,  $C_5 = 1,2586$  мкФ,  $L_5 = 184,452$  мГн. Параметры резонансного звена, настроенного на 7-ю гармонику (420 Гц):  $R_7 = 3,12441$  Ом,  $C_7 = 0,7361055$  мкФ,  $L_7 = 195,075$  мГн. Параметры резонансного звена, настроенного на 11-ю гармонику (660 Гц):  $R_{11} = 16,0247$  Ом,  $C_{11} = 2,356297$  мкФ,  $L_{11} = 24,6787$  мГн.

В качестве выпрямителя применен диодный мостовой выпрямитель. Эквивалентные параметры всех диодов одинаковы:  $R_{S_1} = \dots = R_{S_6} = 1$  мОм,

$L_{S_1} = \dots = L_{S_6} = 5,26526$  мГн. Индуктивность выходного дросселя выпрямителя равна 44,4 мГн.

Для однофазного инвертора приняты следующие параметры: емкость накопителя электрической энергии – 1000 мкФ; эквивалентные параметры ключевых элементов равны 10 мОм и 9,86761 мГн; параметры выходного Г-образного фильтра –  $L = 1$  мГн,  $C = 30$  мкФ. Уровень гистерезиса в системе управления инвертором принят равным 4 мВ.

Высокочастотный канал управления, ключевые элементы и выходной Г-образный фильтр инвертора являются элементами встроенного активного фильтра. Схема высокочастотного канала, реализованная в модели фильтра, здесь не рассматривается.

Схема SMPS мощностью 0,075 кВт показана на рис. 3. Параметры входного Г-образного фильтра:  $L = 28$  мГн,  $C = 0,1$  мкФ.

*Задача первого теста* – показать, что электронное оборудование является источ-

ником электромагнитных помех недопустимой величины при получении питания от источника электрической энергии ограниченной мощности.

*Задача второго теста* – определить эффективность подавления электромагнитных помех в сети питания с помощью встроенного активного фильтра инвертора.

В первом тесте электронное оборудование питается от генератора. Во втором тесте между генератором и электронным оборудованием помещается преобразовательная система (AC/DC/AC-system), состоящая из выпрямителя, инвертора со встроенным активным фильтром и накопителя электрической энергии.

Результаты тестирования математической модели приведены на рис. 7, 8 (диаграмма 1 соответствует первому тесту, диаграмма 2 – второму тесту).

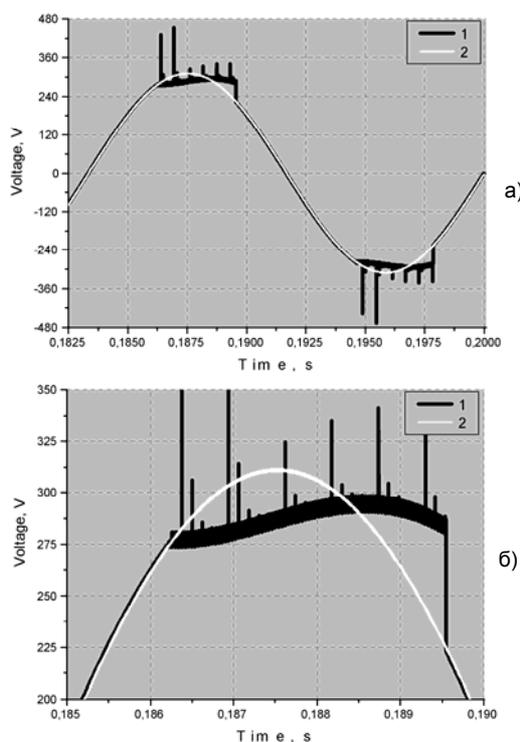


Рис. 7. Диаграммы напряжений на входе SMPS: а – интервал от 0,1825 с до 0,2 с; б – от 0,185 с до 0,19 с

Анализ диаграмм показывает высокую эффективность работы встроенного активного фильтра. В первом тесте качество напряжения на клеммах генератора  $K_U = 0,06995593$ . Во втором тесте –  $K_U = 0,001989998$ . При этом следует отметить комплексный характер воздействия активного фильтра на кондуктивные помехи в сети потребителя электроэнергии. Одновременно устраняются электромагнитные помехи высокой и низкой частот, создаваемые SMPS, и помехи, генерируемые выпрямителем и инвертором AC/DC/AC-system.

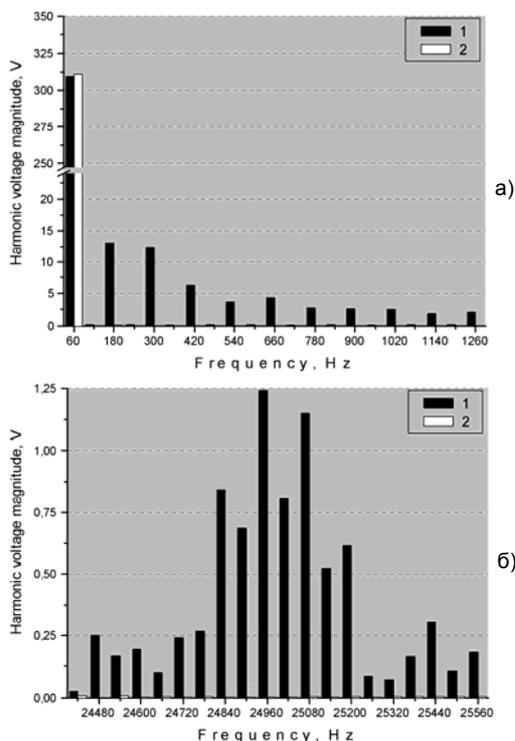


Рис. 8. Частотная диаграмма напряжений на входе SMPS: а – низкие частоты; б – высокие частоты

Встроенный активный фильтр рекомендуется рассматривать как один из предпочтительных вариантов при сопоставлении проектов систем фильтрации кондуктивных помех в АЭС, содержащих каскад AC/DC/AC.

**Тестирование математической модели активного фильтра с релейной системой управления.** Рассмотрим АЭС, состоящую из синхронного генератора мощностью 1 кВт и мостового выпрямителя с активной нагрузкой мощностью 0,075 кВт. Для достижения необходимых параметров качества электроэнергии подключим к входу выпрямителя активный фильтр с релейной системой управления (рис. 9).

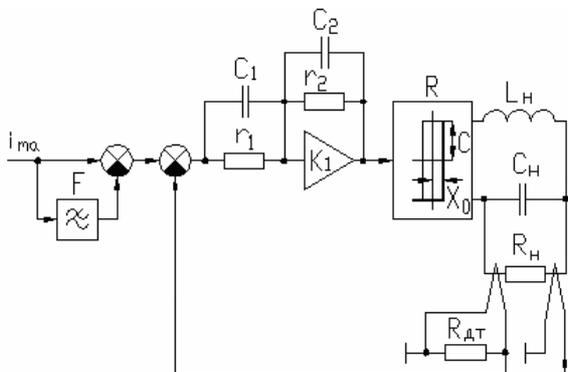


Рис. 9. Функциональная схема активного фильтра с релейной системой управления

Параметры активного фильтра следующие: гистерезис реле  $X_0 = 0,5$  В; амплитуда реле  $C = 380$  В; сопротивление датчика тока  $R_{дт} = 1$  Ом; сопротивление нагрузочного резистора  $R_H = 200$  Ом; индуктивность фильтра низких частот  $L_H = 2,1$  мГн; емкость фильтра низких частот  $C_H = 2$  мкФ; сопротивления фазосдвигающей цепочки  $r_1 = 1$  Ом,  $r_2 = 10$  Ом; емкости фазосдвигающей цепочки  $C_1 = 27$  мкФ,  $C_2 = 165$  нФ.

Результаты тестирования активного фильтра показаны на рис. 10, 11, 12.

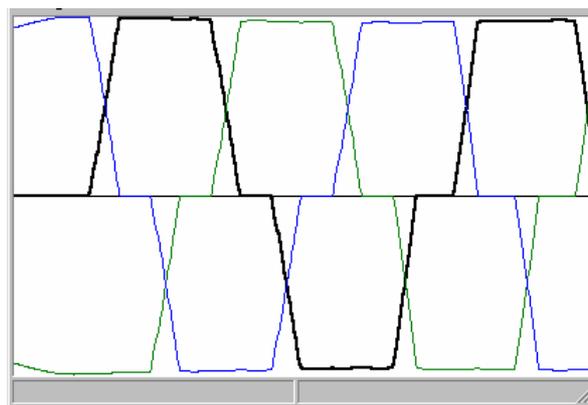


Рис. 10. Фазные токи выпрямителя

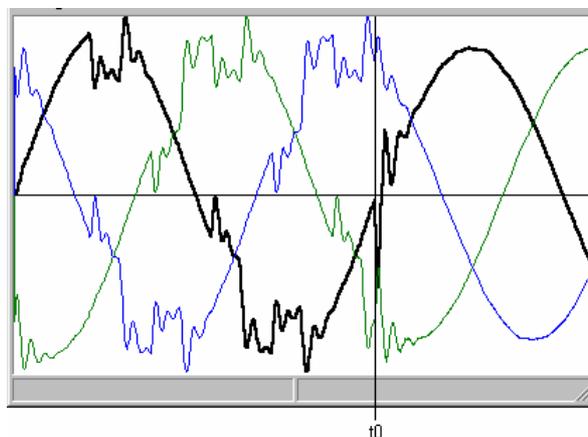


Рис. 11. Фазные напряжения на зажимах синхронного генератора

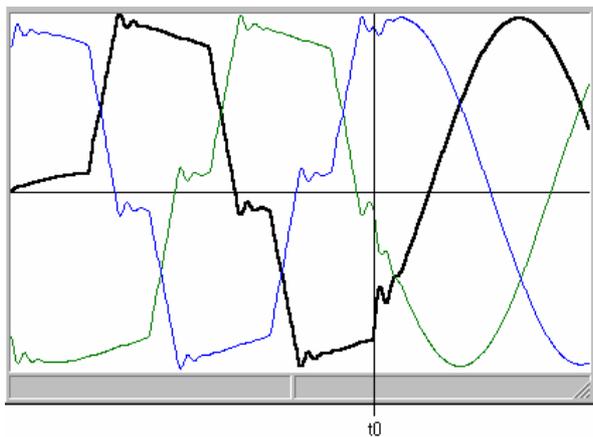


Рис. 12. Фазные токи синхронного генератора

После включения активного фильтра (момент времени  $t_0$ ) в напряжениях на зажимах SG и в его токах практически отсутствуют высшие гармонические составляющие. Это подтверждается и результатами Фурье-анализа.

Результаты тестирования показали, что в АЭС с активным фильтром с релейной системой управления среди составляющих реактивной мощности преобладает мощность сдвига. При ужесточении требований к коэффициенту сдвига рекомендуется использовать активный фильтр в комбинации с другими устройствами энергетической электроники либо изменить закон управления фильтром, достигая более высокого качества электроэнергии. Мощность искажений активный фильтр с релейной системой управления подавляет практически полностью.

**Тестирование математической модели многофазного фильтра с многоступенчатой импульсной модуляцией.** Исследование математической модели активного многофазного ( $m > 3$ ) фильтра с многоступенчатой импульсной модуляцией допустимо проводить при  $m = 1$  (рис. 13). Одной ступени модуляции в фазе соответствует один инвертор напряжения. Каждый инвертор преобразует определенную часть мощности питающего выпрямителя. В каждой ступени осуществляется импульсная модуляция (формирование огибающей выходного напряжения инвертора) путем управления ключевыми элементами. Сформированное переменное напряжение с определенной точностью равно сумме фильтруемых гармоник. Оно противофазно напряжению в узле подключения фильтра и, складываясь с ним, компенсирует мощность искажения. Функциональная схема системы деления сигнала на зоны реализована в математической модели фильтра и здесь не приводится.

Рассмотрим работу активного фильтра в составе АЭС, состоящей из синхронного генератора мощностью 1 кВт и однофазного мостового выпрямителя с активной нагрузкой мощностью 0,075 кВт.

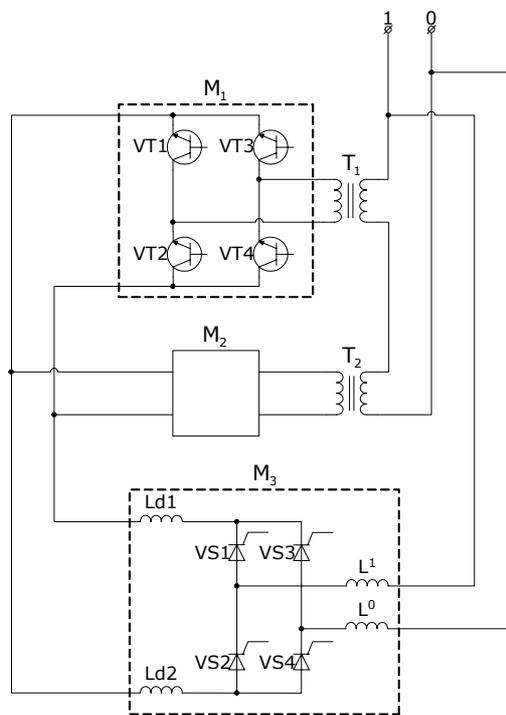


Рис. 13. Однофазный активный фильтр с двухступенчатой импульсной модуляцией

Результаты расчетов зависимостей токов и напряжений от времени показаны на интервале от 0,1 с до 0,2 с. Включение активного фильтра производится в момент времени  $t = 0,145$  с. Таким образом, выбранный интервал времени позволяет наблюдать процесс работы схемы до и после включения фильтра.

На рис. 14 представлены токи, создаваемые инверторами первой и второй ступени в первичной обмотке сетевого трансформатора, и результат сложения этих токов. На рис. 15 приведены зависимости напряжения и тока синхронного генератора от времени. На рис. 16 представлены спектры напряжений и токов до и после включения фильтра.

Полученные результаты тестирования показывают высокую эффективность активного фильтра с многоступенчатой импульсной модуляцией для компенсации искажений в электрических сетях переменного тока. Эту схему следует рассматривать как один из предпочтительных вариантов при сопоставлении проектов систем фильтрации кондуктивных помех в АЭС.

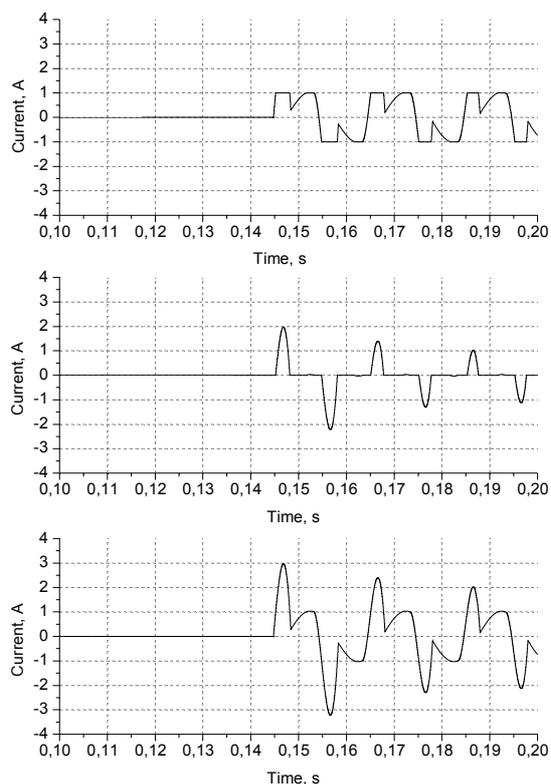


Рис. 14. Формирование токов компенсации

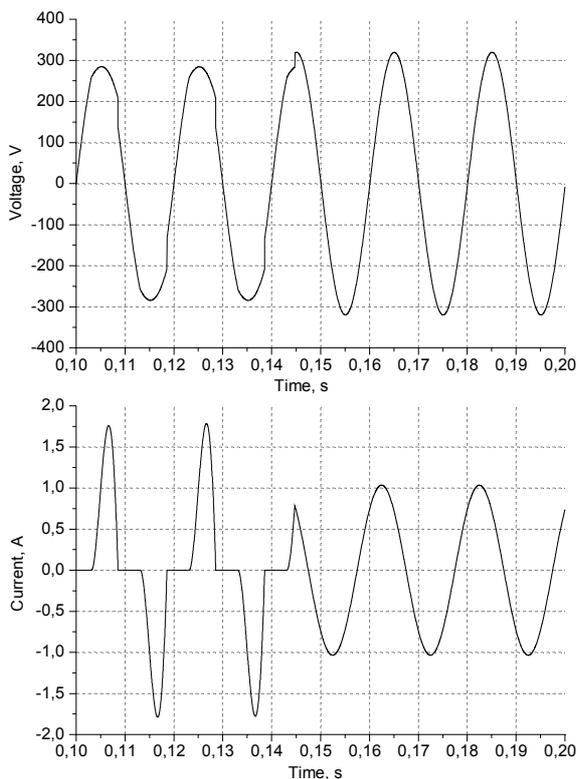


Рис. 15. Временные зависимости напряжения и тока синхронного генератора

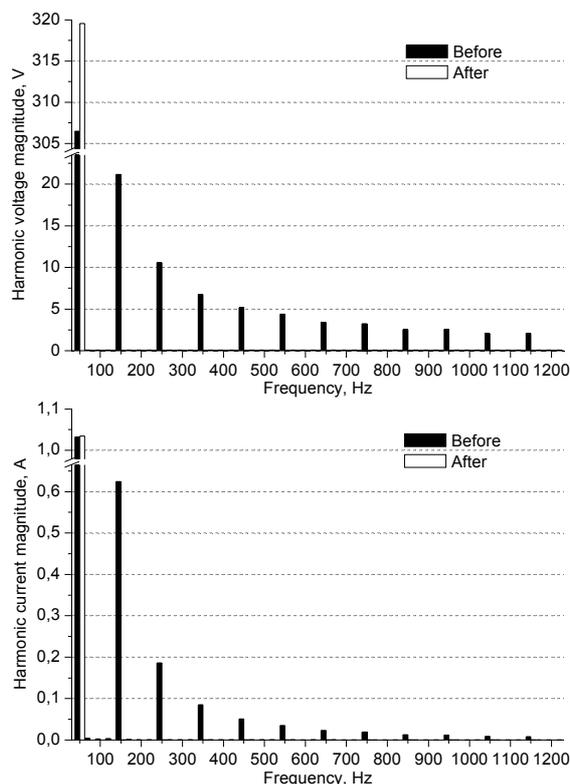


Рис. 16. Спектры напряжений и токов синхронного генератора до и после включения фильтра

### Заключение

Верификация комплекса программ *Emc-CAD* показала его высокую эффективность по сравнению с *MATLAB/Simulink*, при прочих равных возможностях (точность, быстродействие), на этапах подготовки задачи для анализа и интерпретации результатов. Это объясняется специализацией интерфейса и библиотеки базовых элементов *Emc-CAD*.

Тестирование математических моделей активных фильтров экспериментально подтвердило их готовность для включения в базу математических моделей элементов комплекса программ *Emc-CAD* для разработки вариантов систем энергетической фильтрации реактивных мощностей в АЭС.

Результаты тестирования следует рассматривать как важные, но предварительные данные для принятия конструкторских и технологических решений. Они не исключают исследование прототипов технических устройств.

### Список литературы

1. Belov V., Paldyaev N., Shamaev A., Johansson A., Leisner P., Belov I. A Matlab/Simulink model of an active power filter based on multi-stage inverter architecture // WSEAS transactions on circuits and systems. Issue 9, Vol. 4, September 2005, pp. 1217–1221.
2. Belov V., Paldyaev N., Johansson A., Leisner P., Belov I. Mathematical Model of a Multi-phase Active Power Filter Based on Multi-phase Bridge Elements: Proceeding of the 5th WSEAS International Conferences on POWER SYSTEMS AND ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

(PSE'05). Corfu Island, Greece, august 23–25, 2005, ISBN: 960-8457-34-3.

3. **Belov V., Paldyaev N., Shamaev A., Johansson A., Leisner P., Belov I.** Mathematical Modeling of Conducted EMI in an Independent Power Supply System Including Power Line Communication Technology // IEEE International Symposium

on Power-Line Communications and Its Applications (ISPLC), Pisa, Italy, March 26–28, 2007, IEEE Catalog Number: 07EX1730C, ISBN: 1-4244-1090-8, Library Congress: 2007922034.

Белов Владимир Федорович,  
Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева,  
ООО «Инновационно-технологический центр республики Мордовия»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой САПР, директор,  
адрес: 430000, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 28а,  
е-mail: belovvf@mrsu.ru

Пальдяев Николай Николаевич,  
Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева,  
ООО «Предприятие СОФТРИД»,  
преподаватель кафедры САПР, зам. директора,  
адрес: 430000, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 28а,  
е-mail: nikpold@inbox.ru