

УДК 629.735

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭТАПЕ ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЁТА

В.А. Калий

Рассмотрены два типа математических моделей, которые совместно применяются в настоящее время в АО «Технодинамика» при выполнении опытно-конструкторских работ для имитационного моделирования преобразователей электрической энергии при проведении поверочных расчётов. Поверочные расчёты могут выполняться как с помощью статических моделей, так и на основе динамических моделей, которые описываются системами дифференциальных уравнений. При проектировании электротехнических изделий на современном уровне применяются два основных типа динамического моделирования: «снизу вверх» (от частного к общему) и «сверху вниз» (от общего к частному) в итерационном цикле. У каждого типа моделирования свои ограничения и свои преимущества. Поэтому совместное применение этих двух типов моделей в одном итерационном цикле позволяет свести к минимуму недостатки каждой из моделей и существенно повысить как точность отдельно взятого поверочного расчёта, так и точность проектирования изделия в целом. Рассмотрены методы имитационного моделирования на примере опытно-конструкторской работы по созданию трансформаторно-выпрямительного устройства ТВУ-9К для нового самолёта Ил-112В.

Ключевые слова: модель, система уравнений, выпрямительное устройство, преобразователь, система генерирования, численные методы, трансформатор.

Проектирование изделий машиностроения, включая электрические машины и статические преобразователи, состоит из нескольких взаимосвязанных этапов. К одному из таких этапов относится технический проект, который нормируется ГОСТ 2.120-2013. В то же время, разрабатываемая автором методология оптимального проектирования электрических машин предусматривает на данном этапе разработку полной 3D модели изделия и получения массива всех параметров изделия, однозначно его характеризующих и соответствующих требованиям технического задания.

Одним из внутренних этапов технического проектирования электрических машин и преобразователей являются поверочные расчёты, которые выполняются по совокупной геометрической и параметрической модели, полученной в результате проектировочного расчёта [1]. Поверочные расчёты могут выполняться как на основе статических, так и динамических моделей, а также могут выполняться в виде геометрической интерпретации для последующего моделирования работы с помощью численных методов. Любая математическая модель – это фактически первый этап натурных испытаний создаваемого объекта, однако любая математическая модель принципиально не полна, т. е. имеет ограничения. Так, например, в моделях, используемых для определения электромагнитных характеристик практически пренебрегают всеми процессами, кроме электромагнитных. В связи с

этим для получения объективных параметров проектируемого изделия на этапе поверочных расчётов наиболее целесообразно использовать несколько математических моделей проектируемого изделия для получения объективной информации до начала изготовления опытных образцов. Такой подход позволяет существенно сократить ресурсы проекта, необходимые для изготовления и испытаний макетов.

В настоящее время во всех проектах электрических машин и статических преобразователей, реализуемых в АО «Технодинамика», применяется двухуровневое моделирование при проведении поверочных электромагнитных расчётов. В ходе проектирования применяются в итерационном цикле два основных типа динамического моделирования: «снизу вверх» (от частного к общему) и «сверху вниз» (от общего к частному). У каждого типа моделирования свои ограничения и свои преимущества.

Тип модели «сверху вниз» подразумевает следующий подход – изначально создаётся более общая модель системы в первом приближении, в которую входит проектируемое изделие, затем постепенно увеличивается детализация отдельных элементов. Такие модели строятся в основном на основе систем дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, для решения которых наиболее подходит известная среда Matlab Simulink [2]. Основные ограничения здесь – значительные упрощения.

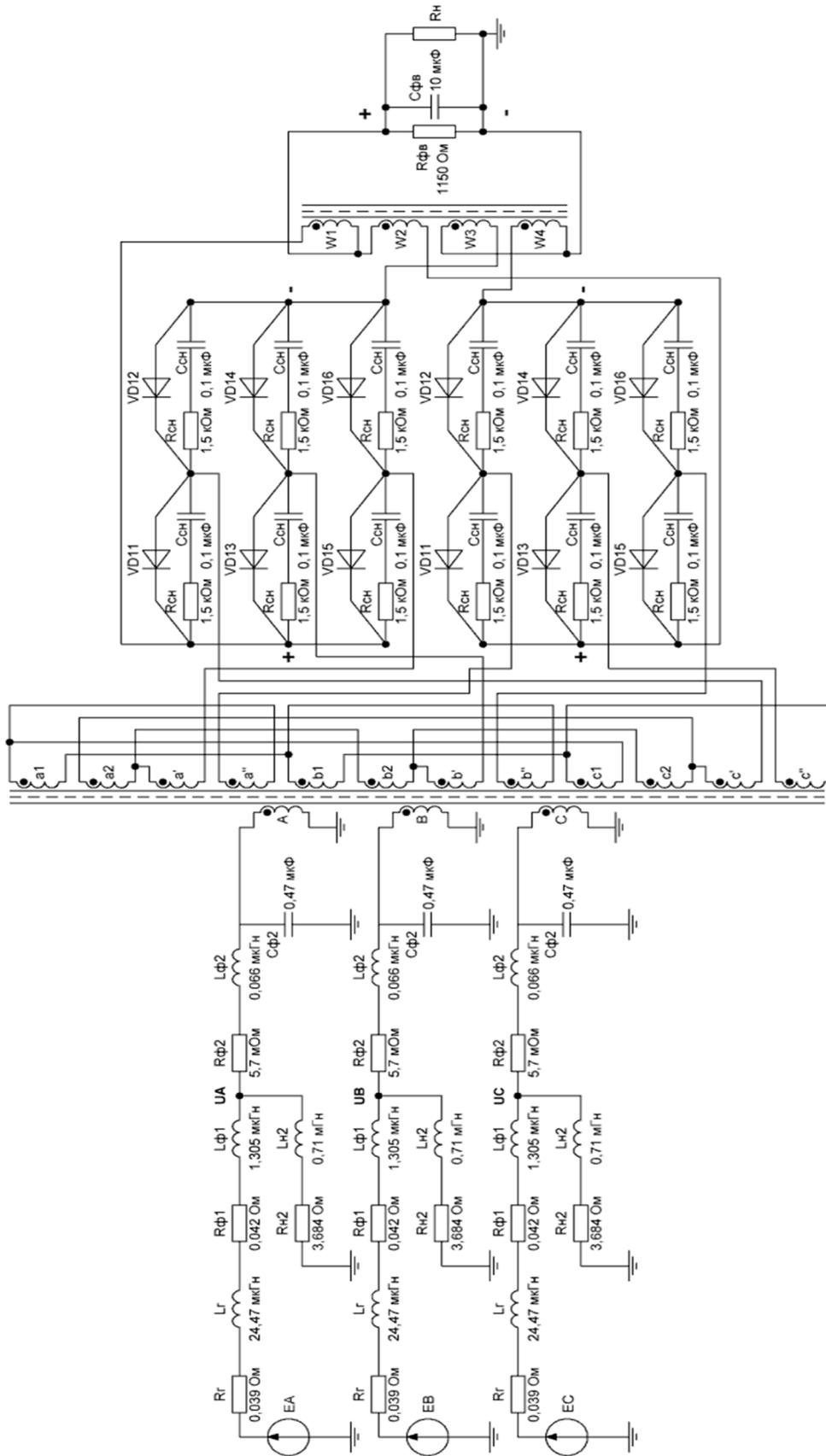


Рис. 1. Полная динамическая модель ТВУ-9 в среде Matlab Simulink

Область применения – изучение совокупности многих режимов работы проектируемого изделия в составе системы.

Реализация подхода «сверху вниз» в среде Matlab Simulink [3] определяется в такой последовательности:

- описание объекта моделирования (*система*);
- выбор режима работы объекта для моделирования;
- представление элементов их математическими моделями;
- определение допустимых упрощений в представлении элементов.

Реализацию этого подхода рассмотрим на примере модели проектируемого в настоящее время трансформаторно-выпрямительного устройства (ТВУ) мощностью 9 кВт для системы генерирования перспективного самолёта Ил-112В. Выпрямительное устройство ТВУ-9К предназначено для преобразования электроэнергии переменного трёхфазного тока напряжением 115/200 В частотой 330 – 460 Гц в электроэнергию постоянного тока напряжением 27 В для питания приёмников воздушного судна. Здесь изначально была разработана динамическая модель с идеальным источником и без соединительных шин и проводов, затем идеальный источник был заменён моделью синхронного генератора (на основе системы уравнений Парка – Горева) и его фидера.

На следующем этапе для наибольшего приближения к реальному объекту было осуществлено ещё одно усложнение модели, а именно, применены компоненты, описывающие уже реальные параметры диодов и трансформаторные связи вторичной цепи (рис. 1).

Моделирование «снизу вверх» реализуется путем создания подробной модели одного элемента системы, затем вокруг неё наращиваются менее детализированные модели прочих элементов. Основным ограничением является резко нарастающее количество необходимых ресурсов при увеличении числа элементов. Область применения – детальное изучение одного конкретного режима работы системы либо её части. На примере ТВУ-9 – геометрическая модель трансформатора, работающего на активную симметричную нагрузку, с добавлением блоков диодов, уравнивающего реактора, фильтров и параметров цепи питания (рис. 2). Реализация подхода «снизу вверх» на примере ANSYS [4]:

- описание объекта моделирования (*трансформатор*);

- разработка схемы силовой части устройства для моделирования;

- выбор основных режимов работы объекта для моделирования;

- адаптация метода конечных элементов и описание возможностей этой модели;

- разработка структуры обобщённой модели объекта, состоящей из геометрической модели объекта и модели электрической цепи.

Между рассмотренными математическими моделями в обязательном порядке устанавливается итерационная связь, т. е. моделирование рабочих режимов осуществляется только совместной их работой. При этом модель «снизу вверх» в качестве входных параметров принимает результаты модели «сверху вниз», а результаты модели «снизу вверх» позволяют детализировать модель «сверху вниз». Как правило, после определённого числа итераций результаты обоих типов моделей совпадают.

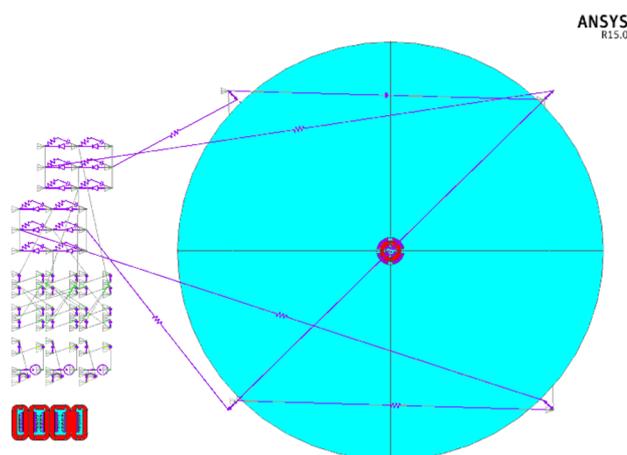


Рис. 2. Геометрическая модель ТВУ-9

В разработанных моделях силовая часть трансформаторно-выпрямительного устройства ТВУ-9 состоит из трансформатора ТрТСПА-10,5-200/22, сглаживающего реактора ДрТС-195-16, двух выпрямительных мостов, а также входного и выходного фильтров. Расчётная частота питающего напряжения соответствует рабочей частоте 400 Гц. Переходные режимы рассчитаны при изменении сопротивления нагрузки, соответствующем изменению мощности нагрузки от заданной номинальной мощности: 10%→160%, 160%→10% и 100%→150%, 150%→100%. Каждое изменение нагрузки происходит линейно за время 0,2 мс.

Результаты расчёта по режимам

№	Доля высших гармоник во входном напряжении, %	Линейные токи вторичных обмоток (ВО1/ВО2), А	Уравнительный ток реактора, А	Средний ток диода (1 блок / 2 блок), А	Среднее значение напряжения нагрузки, В	Размах аperiodической составляющей напряжения нагрузки, В	Среднее значение потерь в расчётной модели, Вт
1	2,0	133 / 134	2,4	55,4 / 55,0	27,2	1,22	966
2	2,3	181 / 182	2,8	75,4 / 74,8	26,6	1,16	1555
7	2,0	133 / 134	2,4	55,4 / 55,0	27,2	1,28	963
8	2,3	180 / 182	2,9	75,4 / 74,7	26,8	1,23	1475
13	2,6	133 / 135	2,6	55,9 / 55,1	27,1	1,23	960
14	3,5	179 / 181	3,2	75,7 / 74,6	26,4	1,07	1541
15	2,7	132 / 135	3,1	55,9 / 55,0	27,1	1,28	955
16	3,7	179 / 182	3,8	75,7 / 74,5	26,6	1,13	1462

Расчётные значения ЭДС генератора подобраны таким образом, чтобы напряжение на шинах присоединения устройства соответствовало номинальному значению 115 В, при этом в зависимости от режима контролируются мощность или ток нагрузки, при необходимости осуществляется корректировка сопротивления нагрузки. Результаты моделирования приведены в таблице.

Расчётные параметры ТВУ-9, полученные с помощью совместного итерационного моделирования, соответствуют не только требованиям по основным параметрам (напряжение, мощность), но и по нелинейным искажениям, предъявляемым к выпрямительным устройствам ГОСТ Р 54073-2010 (коэффициент нелинейных искажений входного тока $\leq 35\%$, коэффициент нелинейных искажений входного напряжения $\leq 8\%$, амплитуда пульсаций выходного напряжения ≤ 2 В). Полученные результаты позволили зафиксировать расчётные параметры разрабатываемого устройства и приступить к этапу разработки 3D модели изделия. При этом в зависимости от рассматриваемых процессов можно

использовать результаты, полученные на той или иной модели.

В заключение необходимо отметить, что применение двух математических моделей для проведения имитационного моделирования режимов работы изделия позволило исключить изготовление макетов проектируемого изделия и существенно снизить длительность его разработки.

Литература

1. Зонтов В. М., Куприн Б. В. Системы электроснабжения летательных аппаратов: Учебник для вузов / В. М. Зонтов, Б. В. Куприн. – М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1988. – 396 с.
2. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М. : ДМК Пресс; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.
3. Худяков В. Ф., Хабузов В. А. Моделирование источников вторичного электропитания в среде MATLAB 7.x: учебн. пособие / В. Ф. Худяков, В. А. Хабузов. – СПб. : ГУАП, 2008. – 332 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 318 с.

Поступила в редакцию 16.06.2016

Валерий Алексеевич Калий, канд. техн. наук,
главный конструктор департамента систем электроснабжения
АО «Технодинамика».
Т. (903) 739-37-21, e-mail: Kalyw@ya.ru.

SIMULATION MODELING of ELECTRICAL ENERGY CONVERTERS for DETERMINATION of THEIR PARAMETERS at the STAGE of CHECKING CALCULATIONS

V.A. Kalii

In the article, two types of mathematical models, used now in combination in checking calculations by the engineers of 'Technodinamica' JC at the stage of R&D work for simulation modeling of electrical energy converters, have been considered. Checking calculations can be performed using static as well as dynamic models described by differential equation systems. Today, two basic types of dynamic modeling are used for developing of electrical products, i.e. 'bottom-upwards' (specific-to-general) and 'top-down' (general-to-specific) in iteration cycle. Each modeling type has its own limitations and advantages. So the use of these two model types in one iteration cycle enables to minimize disadvantages of each model and significantly improve accuracy of an individual checking calculation, as well as entire design accuracy of product. Methods for simulation modeling have been considered through the example of R&D work for developing of the transformer-rectifier TWU-9K for the aircraft IL-112V.

Key words: model, equation system, rectifier, converter, generation system, numerical methods, transformer.

List of References

1. Zontov V. M, Kuprin B. V. Electrical generating systems for aircraft: Learning guide for higher educational institutions / V.M. Zontov, B. V. Kuprin. – M. : Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 1988. – 396 p.
2. Chernykh I. V. Electrical devices modeling using MATLAB SimPowerSystems and Simulink. – M. : ДМК Пресс; St. Petersburg : Питер, 2008. – 288 p.
3. Khudiakov V. F., Khabuzov V. A. Modeling of secondary power supplies using MATLAB7.x: Learning guide / V. F. Khudiakov, V. A. Khabuzov. – St. Petersburg : ГИАИ [SUAI (State University of Aerospace Instrumentation)], 2008. – 332 p.
4. Zenkevich O. Finite-element method for engineering / O. Zenkevich. – M. : Мир, 1975. – 318 p.

*Valerii Alexeevich Kalii, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.).
Chief Designer of Power Supply Systems Department.
T.: (903) 739-37-21, e-mail: Kalyw@ya.ru.
'Technodinamika' JC.*