

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕТЕВОГО ТОКА ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

Щербак Я.В., Ягуп Е.В.

Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта
ekvagup@rambler.ru

This article is devoted to development of mathematics model, intended for research network current of traction substation. The case of 12-pulse rectifier with polyphase transformer is observed. Features of model construction are described, the results of its activity, which verify model adequacy and opportunity of its application for power circuit current of traction substation research.

Вопросы оперативного управления режимами работы тяговых подстанций приобретают в последнее время все более важное значение. Тяговые подстанции железных дорог и городского электротранспорта представляют собой мощные потребители электрической энергии. Их существенное влияние на питающую сеть обусловлено резкими колебаниями нагрузки, что свойственно тяге электропоездов. Немаловажную роль играют высшие гармонические составляющие, генерируемые в сеть из-за нелинейностей, обусловленных наличием нелинейных преобразовательных приборов в выпрямителях тяговых подстанций. Наконец, может проявляться влияние асимметрии, появляющейся вследствие несовершенства конструкции питающего трансформатора, свойств и параметров вентильных групп, а также вследствие некоторой несимметрии самого питающего напряжения.

Указанные факторы вредного влияния на сеть со стороны тяговых подстанций требуют детального анализа электромагнитных процессов для последующего прогнозирования и выработки оптимальных методов и средств управления режимами с целью улучшения работы тяговой подстанции как потребителя электрической энергии. Основную часть тяговой подстанции представляет многофазный мощный выпрямитель, питаемый от многообмоточного трансформатора. Для оценки влияния выпрямителя на питающую сеть необходимо исследовать поведение сетевых токов первичных обмоток трансформатора. Рассмотрение формы этих токов позволяет оценить энергетические показатели выпрямителя и степень его влияния на питающую сеть соизмеримой мощности.

В [1] рассматриваются особенности поведения первичного тока тягового выпрямителя, однако при этом не учитывается влияние режима длящейся коммутации вентилей выпрямителя. Рассматриваемые в [2] осциллограммы сетевых токов и напряжений были сняты экспериментально, при этом также практически измерялся гармонический состав токов и напряжений на стороне сетевой обмотки при помощи терцоктанового анализатора. Однако здесь отсутствуют какие-либо теоретические исследования и расчеты. Между тем, большие возможности, предоставляемые компьютерной техникой, делают реальностью исследования указанных первичных токов тяговой подстанции при помощи математического моделирования. Использование вычислительных методов и средств получило широкое применение для исследования как электронных устройств [3,4], так и устройств для преобразования параметров электрической энергии [5]. Поэтому в настоящей работе поставлена задача разработки и создания математической модели выпрямителя тяговой подстанции, ее реализация на персональном компьютере, отладка и проверка ее адекватности путем воспроизведения электромагнитных процессов, протекающих в объекте.

В качестве объекта исследования выбрана последовательная схема двенадцатипульсового неуправляемого выпрямителя, собранного по схеме звезда/звезда-треугольник (см. рис.1). Вентильные секции соединяются исключительно по мостовой схеме. Чтобы выпрямленное напряжение было симметрично, напряжение на каждой из обмоток треугольника должно в 1,73 раза превышать напряжение на каждой из вторичных обмоток, соединяемых звездой. Это в свою очередь возможно, если индуктивности обмоток треугольника в 3 раза превосходят индуктивности вторичных обмоток, соединяемых в звезду. Для первого приближения будем придерживаться определенных допущений, полагая трансформатор линейным и не подверженным насыщению сердечника. Количество магнитных связей примем минимальным, то есть будем полагать, что индуктивно связаны лишь катушки индуктивностей, расположенные на одном стержне. Взаимными индуктивными связями катушек, расположенных на разных стержнях пока будем пренебрегать ввиду их незначительности, хотя в общем случае может потребоваться детальный анализ погрешностей при таком допущении, например, в случае возникновения несимметричных режимов. Благодаря такому упрощению удастся уменьшить количество магнитных связей с 36 до 9. Таким образом, мы принимаем идеализированную модель трехстержневого трансформатора, заменяя его группой трех однофазных трехобмоточных трансформаторов. В [6] доказывается допустимость такой замены для случая идеально уравновешенного по м.д.с. трансформатора. Такой же концепции придерживаются разработчики расширения Power System Blockset из системы моделирования Simulink математической системы MATLAB [7], где все трехфазные трансформаторы представляются системами из трех однофазных

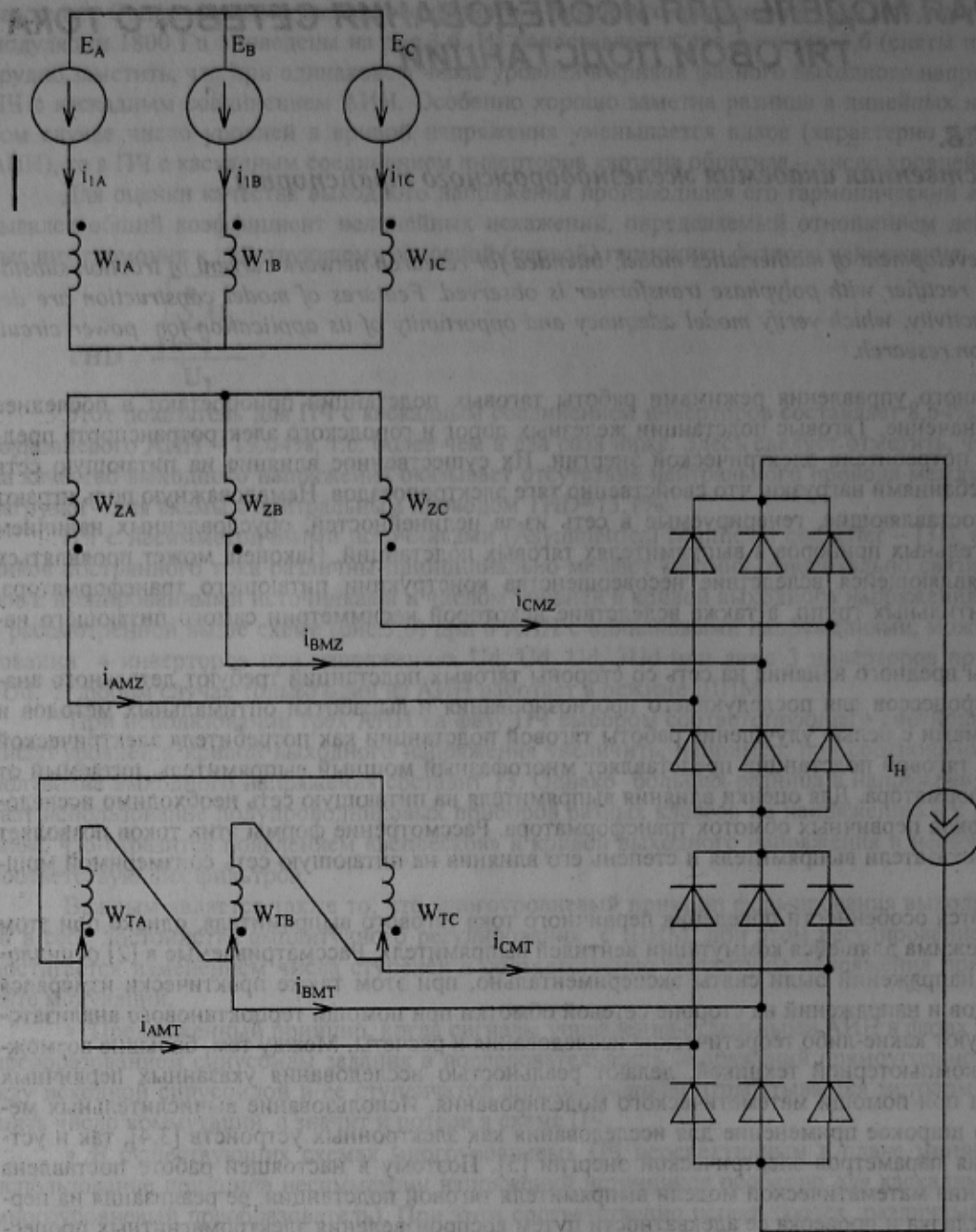


Рис. 1

трансформаторов (в чем можно убедиться из описаний этих элементов в электронной справке, а также рассматривая схемы замещения этих элементов по команде Look under mask). Для количественной оценки степени магнитной связи обмоток достаточно использовать коэффициент их связи, который определяет взаимную индуктивность между соответствующими обмотками и соответственно величину индуктивности рассеивания.

Для моделирования диодов используется кусочно-линейная аппроксимация вольтамперных характеристик диодов [5,6], когда они заменяются резисторами, скачкообразно изменяющими величины сопротивлений при изменении состояния соответствующего диода. Для имитации работы диодов разработаны алгоритмы и написаны программные процедуры, которые обследуют на каждом шаге моделирования токи открытых диодов и напряжения на закрытых диодах. Если внутри шага фиксируется изменение состояния диода, то наблюдается изменение знака обследуемого тока или напряжения. В этом случае предпринимаются вычислительные действия, направленные на уточнение величины укороченного шага моделирования, на конце которого и отрабатывается изменение состояния переключающегося диода. Указанные алгоритмы позволяют обеспечить автоматическое слежение за состояниями диодов и переключения их в нужные моменты модельного времени.

Для формирования дифференциальных уравнений, описывающих поведение схемы внутри каждого интервала неизменности состояния диодов, применяется алгоритм формирования дерева [3,4]. При этом в дерево включаются обязательно источники напряжения питающей сети, а также резисторы. На представленной схеме замещения резисторы как таковые отсутствуют, хотя при необходимости учета реальных потерь в обмотках

каждая из обмоток трансформатора должна быть представлена последовательно соединенной индуктивностью и активным сопротивлением, отображающим потери в меди обмотки. Для представленного идеализированного случая обмотки трансформатора полагаются идеальными индуктивностями. При этом в топологической структуре графа эквивалентной схемы полагаются идеальными индуктивностями. При этом в топологической структуре графа эквивалентной схемы полагаются идеальными индуктивностями. При этом в топологической структуре графа эквивалентной схемы полагаются идеальными индуктивностями. При этом в топологической структуре графа эквивалентной схемы полагаются идеальными индуктивностями.

$$\frac{dX}{dt} = AX + BQ$$

в следующем виде

где **A** и **B** - матрицы соответствующих коэффициентов, которые отыскиваются в процессе работы алгоритма формирования уравнений состояния. Для рассматриваемой модели тягового выпрямителя в качестве переменных состояния выступают токи обмоток трансформатора, а в роли источников - три источника напряжения питающей сети и источник тока нагрузки, который полагается идеально сглаженным, то есть постоянным. Поэтому размер системной матрицы **A** равен (9×9), а размер матрицы **B** - (9×4). Коэффициенты этих матриц периодически пересчитываются для каждого вновь возникающего состояния вентилей, поскольку сопротивления заменяющих их резисторов изменяются в зависимости от состояний вентилей по описанному выше алгоритму. Для этого при изменении состояния переформируется дерево, причем для повышения точности в дереве рекомендуется включать резисторы с превалирующими проводимостями - так называемое дерево максимальной проводимости, обеспечивающее уменьшение вычислительных погрешностей.

Сформированная система уравнений по методу переменных состояния на интервале неизменности состояния вентилей может быть проинтегрирована при заданных начальных значениях переменных состояния, представляющих собой значения переменных состояния на конце последнего шага интегрирования. Для интегрирования систем дифференциальных уравнений методом переменных состояния в принципе теоретически можно было бы воспользоваться одним из известных численных методов - Рунге-Кутты, Адамса-Маултона [3, 4] и т.п. Однако, следует учитывать, что введение в схему развязывающих резисторов с большими сопротивлениями придают системе уравнений свойство жесткости, поэтому на практике явные методы интегрирования в данном случае оказываются несостоятельными из-за возникновения численной неустойчивости вычислительного процесса. Поэтому разработанная модель выпрямителя тяговой подстанции была настроена на использование неявного метода Эйлера, отличающегося относительной простотой, высокой скоростью вычислений и относительно несложным алгоритмом реализации на основе использования уже сформированных систем уравнений по методу переменных состояния, которые представляют дифференциальные уравнения в форме задачи Коши.

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + h \frac{dX^{(k+1)}}{dt}$$

С этой целью используем следующую рекуррентную формулу для продвижения системы на одном шаге:
где *h* - величина шага интегрирования, а верхние индексы (*k*) и (*k+1*) относятся к значениям переменных состояния и их производных на конце предыдущего и последующего шагов интегрирования. Учтем, что

$$\frac{dX^{(k+1)}}{dt} = AX^{(k+1)} + BQ^{(k)}$$

и подставим это выражение а предыдущее:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + h(AX^{(k+1)} + BQ^{(k)})$$

Производя матричные операции и вводя обозначение **I** для единичной матрицы, можем получить в матричном виде рекуррентную формулу неявного метода Эйлера:

$$X^{(k+1)} = (I - hA)^{-1}(X^{(k)} + hBQ^{(k)})$$

Описанные методы и алгоритмы были реализованы на алгоритмическом языке высокого уровня, причем программа снабжена возможностью построения графиков и проведения гармонического анализа токов и напряжений, рассчитываемых в процессе моделирования. Процесс моделирования осуществляется в нормированном времени и пространстве нормированных параметров схемы [4], что позволяет повысить точность вычислений и сделать их более наглядными. Период питающего напряжения при этом полагается равным 2 с.

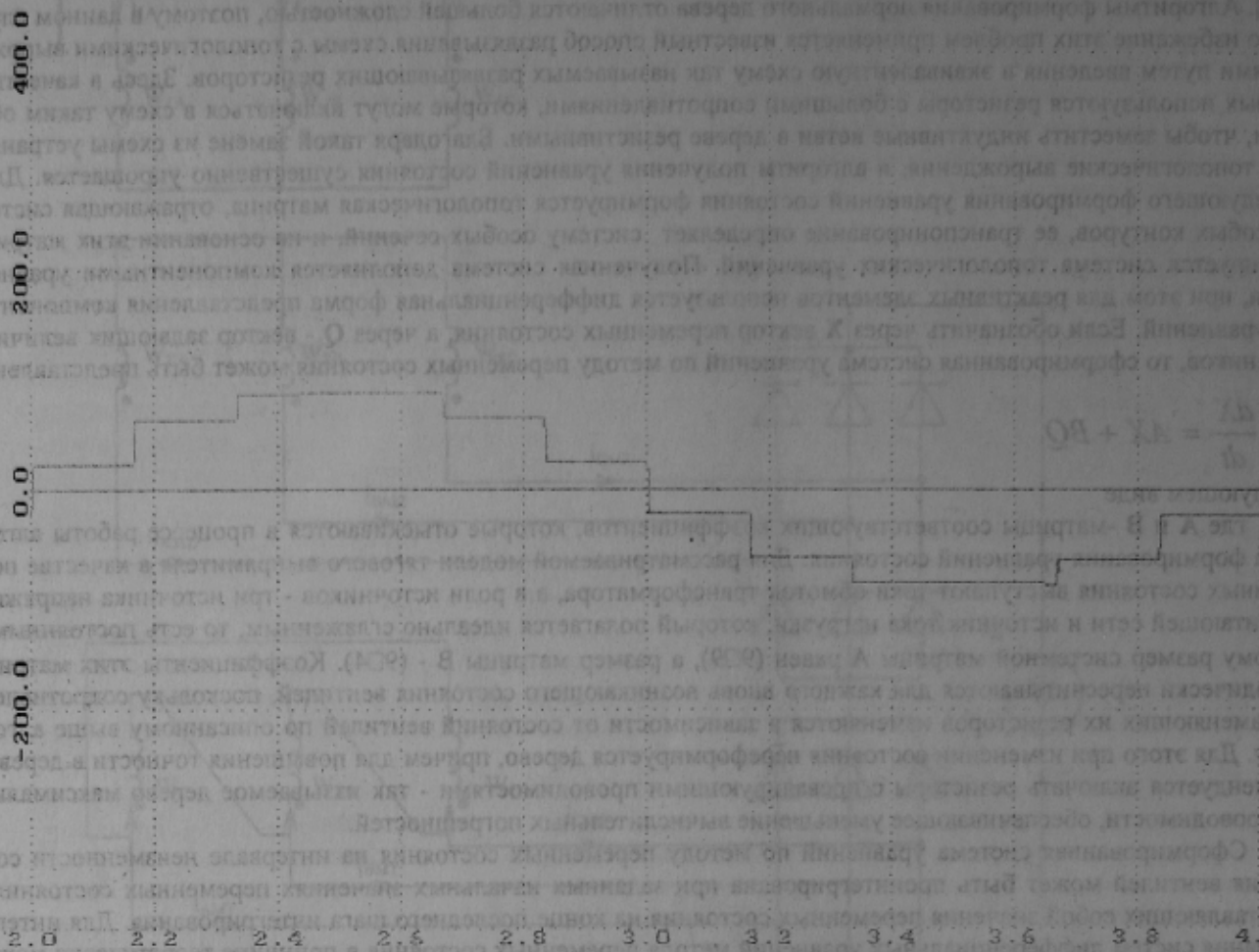


Рис. 2

Проверка модели при различных параметрах схемы показала высокую ее надежность и точность. На рис. 2 показаны кривые выходного напряжения и сетевого тока тягового выпрямителя для одного из вариантов моделирования при условиях, что трансформатор по параметрам приближается к идеальному: индуктивности обмоток устремлены к бесконечности, их активные сопротивления равны нулю, а коэффициенты взаимных связей приближаются к единице. В этом случае практически отсутствует ток намагничивания, углы коммутации близки к нулю, и поэтому сетевой ток представлен суммой ступенчатых функций [1,6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарро М. Электрическая тяга. - М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1959.-387 с.
2. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б.С. Барковский, Г.С. Мага, В.П. Маценко и др.; Под ред. М.Г. Шалимова. - М.: Транспорт, 1990. - 127 с.
3. Чуа Л., Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы / Под ред. В.Н. Ильина : Пер. с англ. - М.: Энергия, 1980. -640 с.
4. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем. - М.: Сов. радио, 1976. -608 с.
5. Расчет устройств преобразовательной техники / В.С. Руденко, В.Я. Жуйков, И.Е. Коротеев. - К.: Техніка, 1980.- 135 с.
6. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. - М.: Наука, 1970. -320 с.
7. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя. - М.: СОЛОН-Пресс, 2002. -768 с.

Рекомендовано до друку д.т.н. проф. Сивокобиленко В.Ф.