

УДК 621.3.011.72

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Абыкаева Назгуль Абийрбековна, соискатель КГТУ им. И. Раззакова Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: nsg-83@mail.ru

Целью данного анализа является поиск оптимального варианта вычисления и моделирования сложных нелинейных электрических цепей с помощью компьютерных программ. В статье рассматриваются основные методы расчета нелинейных электрических цепей, проанализированы достоинства и недостатки всех существующих методов, а также осуществлено моделирование нелинейной системы, описываемой уравнением Ван дер Поля. В основу моделирования положено использование программы Matlab в пакете Simulink.

Ключевые слова: Нелинейный элемент, нелинейные цепи, нелинейные устройства, вольт-амперная характеристика, аппроксимация, линеаризация, графо-аналитические методы, метод итерации.

THE ANALYSIS OF THE EXISTING METHODS OF CALCULATION OF NONLINEAR ELECTRIC CHAINS

Abykaeva Nazgul Abiirbekovna, KSTU named after I. Razzakov, Kyrgyz Republic c.Bishkek, e-mail: nsg-83@mail.ru.

The purpose of this paper is to develop the best possible calculations and modeling of complex non-linear electric circuits with help of computer programs and analysis methods. The article deals with the basic methods of calculation of non-linear electric circuits, types of connections and determination of the parameters analyzed the advantages and disadvantages of the existing methods, as well as carried out modeling of nonlinear system described by the van der Pol equation. The basis of the simulation is necessary to use software package Matlab Simulink.

Keywords: Nonlinear element, nonlinear chains, nonlinear devices, volt-ampere characteristic, approximation, linearization, graphic-analytical methods, iteration method.

Нелинейные элементы (НЭ) получают в настоящее время все более широкое распространение, так как они дают возможность решать многие технические задачи. С помощью НЭ можно осуществить преобразование переменного тока в постоянный, усиление электрических сигналов, генерирование электрических сигналов различной формы, стабилизацию тока и напряжения, вычислительные операции и т.д. Широко используются в радиотехнических устройствах, в устройствах промышленной электроники, автоматики, измерительной и вычислительной техники. Работа таких устройств основана на использовании свойств и явлений нелинейных цепей (НЦ). Поэтому исследование процессов, происходящих в нелинейных электрических цепях (НЦ) является одним из актуальных вопросов электротехники и электроэнергетики.

В нелинейных устройствах (НУ) явления весьма сложны, при этом отсутствуют общие методы анализа и расчета. В общем случае электрическое (или магнитное) состояние НЦ описывается на основании законов Кирхгофа. При этом принцип наложения не

применим, поэтому методы расчета, разработанные для линейных схем на основе законов Кирхгофа и принципа наложения, в общем случае не распространяются на нелинейные схемы. Метод контурных токов использовать также нельзя в связи с невозможностью выбора контуров, чтобы каждый из нелинейных элементов (НЭ) входил только в один из них. Поэтому проблемой является нахождение более эффективного способа расчета параметров цепей, содержащих нелинейные элементы.

Описание НЦ происходит в зависимости от поставленной при исследовании задачи и выбранного метода анализа. Известные приемы и способы имеют различные возможности и области применения. С помощью ряда методов можно решить конкретную задачу НЦ, при этом важно выбрать наиболее эффективные методы для НЦ постоянного и переменного тока.

Существуют большое количество аналитических и неаналитических методов расчета, в основу которых положены законы Кирхгофа и вольт - амперные характеристики (ВАХ) элементов.

Традиционный метод расчета, который описывается ВАХ имеет зависимость тока от напряжения, называемый графическим методом. При графическом расчете характеристики всех ветвей цепи следует записать в функции одного общего аргумента. Благодаря этому система уравнений сводится к одному нелинейному уравнению с одним неизвестным. Метод применяется для расчета цепей, содержащих только один источник, и выполняется графически, путем графического сложения соответствующих ВАХ элементов.

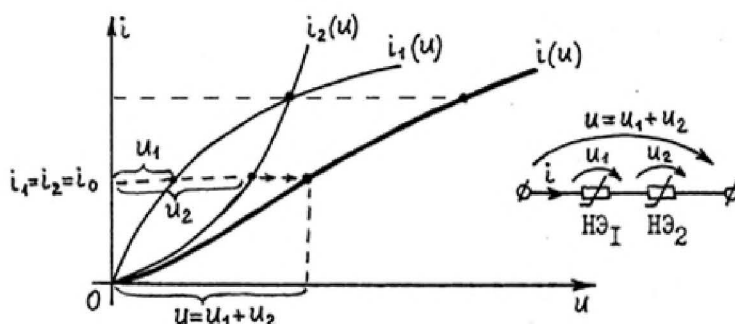


рис.1 Графическое построение ВАХ двух последовательно соединенных НЭ.

При этом различают цепи с последовательным, параллельным и смешанным соединениями. При последовательном соединении двух элементов: напряжения на них складываются, а ток — общий, т. е.

$$U = U_1 + U_2, \quad i_1 = i_2 = i.$$

Значит, для получения искомого графика $i(u)$ надо графики $i_1(u)$ и $i_2(u)$ «сложить по горизонтали». Для некоторого фиксированного тока i_0 график показан на рис. 1.

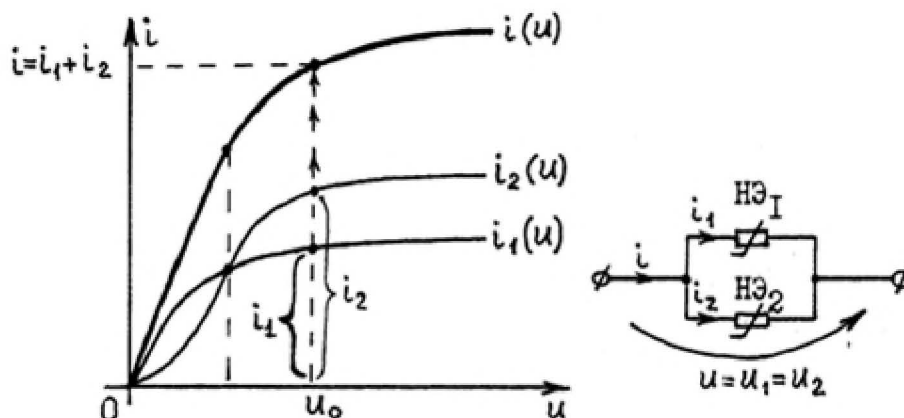


рис.2. Графическое построение ВАХ двух параллельно соединенных НЭ.

При параллельном соединении двух элементов общим для них является напряжение, а ток через их цепочку равен сумме токов в ветвях:

$$U_1 = U_2 = U_0, i = i_1 + i_2.$$

Следовательно, для получения результирующей ВАХ $i(u)$ параллельной цепочки надо графики $i_1(u)$ и $i_2(u)$ «сложить по вертикали». На рис.2 показан график для некоторого фиксированного напряжения U_0 .

При смешанном соединении построение ВАХ цепи можно произвести поэтапно, используя правила для последовательного и параллельного соединений.

Преимуществом графического метода является простота и наглядность решения задачи, с другой стороны не устанавливается количественная взаимосвязь между изменением параметров устройства и величинами его токов и напряжений. В таких случаях используются графо-аналитические методы, при которых часть зависимостей определяется графически, а часть – аналитически.

Графические методы могут быть использованы и при анализе динамических процессов в нелинейных цепях. Сюда, в частности, можно отнести метод графического интегрирования, метод изоклин и метод фазовой плоскости [3].

Методы, применяемые в линейных электрических цепях, таких как метод двух узлов, замена нескольких параллельно включенных ветвей одной эквивалентной, метод эквивалентного генератора, также применимы к нелинейным цепям [1].

Исследования общих свойств НЦ удобно осуществлять аналитическим методом, базирующемся на аппроксимации. *Аппроксимация* (или приближение) - научный метод, состоящий в замене одних объектов другими, в каком-то смысле близкими к исходным, но более простыми. Поскольку составленные по законам Кирхгофа уравнения не имеют точного аналитического описания в сложной системе, то их аппроксимируют известными аналитическими функциями, которые могут быть как линейными так и нелинейными. Аналитическими выражениями могут быть степенные многочлены, логарифмические и экспоненциальные функции, которые выбираются в зависимости от характеристики НЦ, что должны представлять достаточную простоту выполнения математических операций. Общий принцип аппроксимации степенным полиномом рассмотрен в работе А.П. Степанова [9]. Такие математические операции дают возможность анализировать не только для частных значений параметров, но и в общем виде.

Для анализа как статических, так и динамических режимов работы нелинейных цепей широко используется метод аналитической аппроксимации, метод кусочно-линейной аппроксимации и метод линеаризации [3].

Точность и сложность расчета методом аналитической аппроксимации непосредственно зависят от вида принятой аналитической функции, аппроксимирующей характеристику нелинейного элемента. Поэтому ее выбор является важнейшим этапом при анализе цепи данным методом. Для получения большей точности расчета необходимо выбирать аппроксимирующую функцию, наиболее соответствующую исходной нелинейной характеристике, что, однако, может привести в общем случае к появлению в уравнениях состояния сложных математических выражений, часто трудно разрешимых аналитически. С другой стороны, принятие чрезмерно простой функции для аппроксимации позволяет достаточно быстро получить результат, однако погрешность расчета может оказаться недопустимо высокой. Таким образом, выбор аппроксимирующей функции во многом зависит от поставленной задачи расчета и требуемой точности его результатов.

Метод кусочно-линейной аппроксимации, введенный Н.Д. Папалекси, предусматривает отдельное интегрирование линейных дифференциальных уравнений, которые составляются для каждого интервала промежутка повторяемости. На каждом интервале схема является линейной. Неизвестные токи и напряжения находятся с точностью до постоянного интегрирования. Такой метод расчета имеет несколько этапов [5].

Переход каждому к следующему интервалу приводит к изменению коэффициентов в уравнениях системы при непрерывности переменных состояния. Это свойство используется

для задания начальных условий при интегрировании на данном интервале – определение постоянных интегрирования осуществляется на базе сопряжения или припасовывания решений для переменных состояния на соседних интервалах.

Одним из методов расчета нелинейной цепи является такое ее упрощение, основанное на пренебрежении относительно малыми величинами, чтобы можно было применять методы расчета линейных цепей, но при решении «квазилинейной» задачи вводить некоторые коррективы, обусловленные нелинейностью. Например, при расчете нелинейных цепей переменного тока, в которых значение высших гармоник относительно невелико, несинусоидальные токи заменяют эквивалентными синусоидами и применяют комплексный метод расчета, но с учетом нелинейной зависимости между действующими значениями и фазами эквивалентных синусоид тока и напряжения.

Упрощение задачи по существу является заменой нелинейной зависимости линейной, справедливой только для определенного значения амплитуд тока или напряжения. Поэтому этот метод называется методом гармонической линеаризации, который применен в работах Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси, затем в работах Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова и получил дальнейшее развитие в работах Л. С. Гольдфарба, Е. П. Попова и др. применительно к задачам теории автоматического регулирования.

При расчете переходных процессов метод условной линеаризации основывается на приближенной замене нелинейной функции линейной и применении решений линейного уравнения с последующим уточнением результата введением поправок. Этот метод дает очень приближенное решение задачи, однако он наиболее прост и поэтому применяется для ориентировочного расчета процессов, анализ которых более точными методами представляет значительные трудности [6]. Аналитический метод расчета токов или напряжений, при котором используются величины статического сопротивления $R_{ст}$ нелинейного элемента, называется методом итераций. В расчете цепей задаются ориентировочно предполагаемые значения $R_{ст} = R_{ст}^{(0)}$ (нулевые приближения) и определяется ток. Так как $R_{ст}$ зависит от тока (напряжения), то его точное значение неизвестно до получения результатов расчета. По характеристике нелинейного элемента, заданной графически или аналитически, уточняют величину статического сопротивления в полученной рабочей точке, т.е. определяют следующее, первое приближение $R_{ст}^{(1)}$. С его помощью снова рассчитывают ток нелинейного элемента и находят второе приближение $R_{ст}^{(2)}$. Процесс последовательных приближений продолжают до тех пор, пока разность двух последующих значений тока не станет меньше допустимой погрешности. Если процесс итераций получается расходящимся, то вместо расчета тока нелинейного элемента определяют его напряжения, далее по ВАХ находят ток, а затем сопротивление. В задании предлагается рассчитать цепь с элементом, ВАХ которого хорошо аппроксимируется степенной функцией:

$$i = aU^n \text{ или } U = ai^n$$

Однотипные математические операции, приводящие в результате их многократного применения к получению результата с требуемой степенью точности, хорошо поддаются машинной алгоритмизации и широко используются при расчете сложных нелинейных цепей на ЭВМ. «В настоящее время разработаны и получили распространение программы, например, Electronics Workbench, которая реализует блочный принцип моделирования, т.е. общая модель какой-либо электрической цепи получается из «сшивания» отдельных блоков (моделей) элементов этой цепи, которая затем исследуется» [9].

Практически все задачи нелинейных электрических цепей решаются в вычислительной системе MATLAB. С использованием пакета Simulink системы MATLAB проведено моделирование нелинейной системы (рис.3), описываемой уравнением Ван дер Поля:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + A(x^2 - 1)\frac{dx}{dt} + Bx = 0.$$

Уравнение описывает свободные автоколебания одной из простейших нелинейных колебательных систем (осциллятора Ван дер Поля).

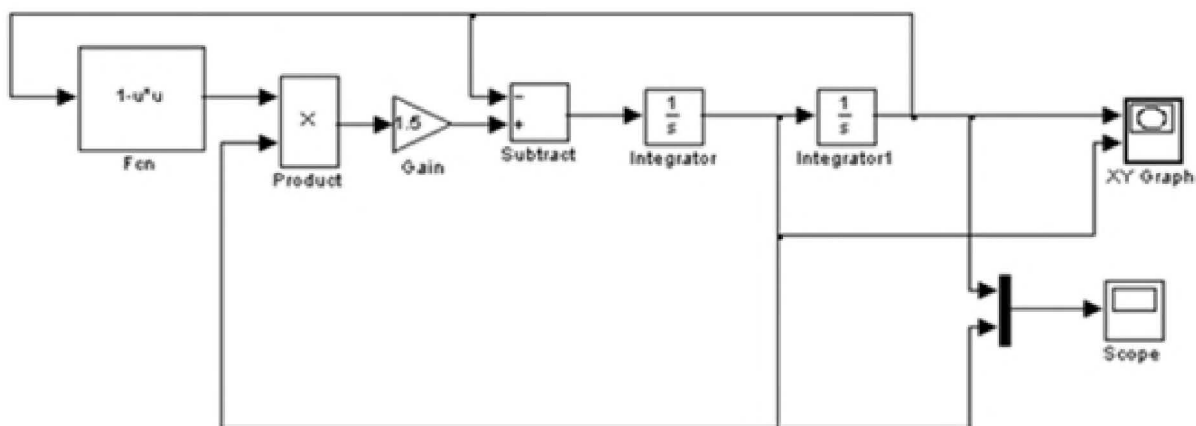


рис.3 Моделирование нелинейной системы на пакете Simulink.

Результаты модели показаны на виртуальных осциллографах (рис .4)

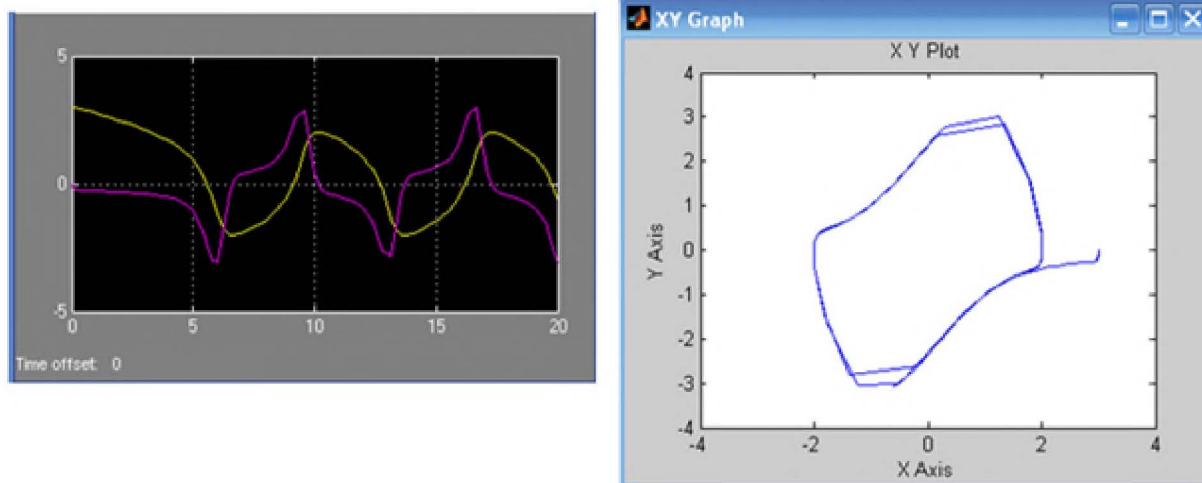


рис.4 Результаты моделирования

Достоинством такого моделирования является его математическая и физическая наглядность, максимальная простота и минимальное время решения, возможность качественной проверки результатов. В компонентах моделей Simulink можно задавать не только фиксированные параметры, но и математические соотношения, описывающие поведение моделей.

Выводы: Сложные нелинейные электрические цепи могут быть рассчитаны и исследованы выбором методов в зависимости от сложности электрической цепи, но приближенные аналитические методы не всегда дают желаемый результат из-за приближенных формул. С помощью вычислительной техники можно добиться высокой точности и скорости вычисления, а также осуществить моделирование таких нелинейных электрических цепей. При этом важно оценить, какова эффективность алгоритмов такой техники обеспечивает достоверность результатов анализа. Разработка оптимальных алгоритмов вычисления и моделирования сложных нелинейных электрических цепей является актуальным вопросом на сегодняшний день.

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. Изд. 9-е, перераб. и доп.-М.: Высшая школа, 1996.- 412 стр.
2. Волобоев В.Г. Об одном подходе к моделированию нелинейных электрических цепей по частям/ В.Г.Волобоев, В.П. Клименко // Математические машины и системы 2010.- №3.
3. Голубев А.Н. Методы расчета нелинейных цепей. Учебное пособие / А.Н. Голубев. Иваново, 2001. – С. 11-13.
4. Гельднер К. Нелинейные системы управления./К. Гельднер, С. Кубик. МИР, 1987. –С.281-291.
5. Дед А.В. Методы расчета электрических цепей содержащих нелинейные элементы/А.В. Дед, В.Н. Горюнов.//Омский вестник. - №1 (64).
6. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. Учебник для вузов/ Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин.- М., Энергия 1975
7. Новгородцев А.Расчет электрических цепей в Matlab. Учебный курс/ А.Новгородцев Питер, 2004.-стр 213-225.
8. Пухов Г.Е. О расчете нелинейных цепей переменного тока/Г.Е. Пухов, С.П. Амосова // Известия Томского Политехнического университета .-2003.- №7.- Т306
9. Степанов А.П. Расчет нелинейных электрических и магнитных цепей. Учебное пособие по ТОЭ/А.П. Степанов.- Иркутск, 2006

УДК 621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ РЕСИНХРОНИЗАЦИИ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ ЧЕРЕЗ ЛЭП НА СИСТЕМУ

Джунуев Тимур Тилегенович, старший преподаватель, Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Мира, 66, email: timaaha@mail.ru

Цель работы - рассматриваются условия ресинхронизации гидрогенераторов, работающих через ЛЭП на электрическую систему ограниченной мощности, т.е. когда мощность электрической станции соизмерима с мощностью электрической системы. Опыт эксплуатации показал, что часто выпавший из синхронизма генератор можно синхронизировать, не отключая его от сети, путем регулирования впуска рабочего тела в турбину, а также регулированием возбуждения генератора. При динамических нарушениях устойчивости переход относительной скорости через нуль $v=d\delta/dt=0$ и последующее уменьшение угла являются необходимым условием для последующей синхронизации и принимаются (в первом приближении) в качестве критерия непосредственной синхронизации.

Ключевые слова: ресинхронизация, гидрогенератор, линия электропередачи (ЛЭП), турбина, регулирование возбуждением, устойчивость, авария, критерий, асинхронный режим, ротор.

DEFINITION OF THE CONDITIONS OF RESINKHRONIZATION GIDROGENERATOROV WORKING THROUGH A POWER LINE FOR SYSTEM

Dzhunuyev Timur Tilegenovich, the senior teacher, the Kyrgyz state technical university of I. Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Mira Ave., 66, email: timaaha@mail.ru

The work purpose - is considered conditions of a resinkhronization of the hydrogenerators working through the high voltage line electric system of limited power i.e. when the power of power plant is commensurable with a power of electric system. Operating experience showed that