

УДК 621.324.21

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО

О.Ю. ВЕРШИНIN¹

¹072240@mail.ru

¹ ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Поступила в редакцию 26.04.2023

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования параметрических трансформаторов и возникающие при этом проблемы. Известно, что в параметрических трансформаторах принцип работы строится на периодическом изменении параметров колебательной системы, вследствие этого возникают сложности при использовании стандартных инструментов моделирования электротехнических систем. Проведено моделирование с использованием программы Electronics Workbench. По результатам проведенной работы сделаны выводы, определены условия для создания более проработанных моделей ПТ.

Ключевые слова: параметрический трансформатор, колебательный контур, глубина модуляции индуктивности, параметрическая ЭДС, Electronics Workbench (EWB).

ВВЕДЕНИЕ

В 21 веке вследствие активного развития электроники электротехники, появлении все большего количества электрооборудования с различной чувствительностью на условия внешней среды, требованиями к питанию для штатной работы, ресурсу надежности появляется необходимость разрабатывать новые изделия для более эффективной работы в связках с различным оборудованием.

На сегодняшний день в условиях экономии ресурсов на опытное производство и испытания при проектировании электротехнических устройств наряду с аналитическим расчетом применение моделирования становится не просто желательным, но абсолютно необходимым. Однако в ряде случаев моделирование электротехнических систем может быть затруднено не стандартным или малоиспользуемыми в электротехнике физическими явлениями, а отсутствием необходимого функционала и инструментов в программном обеспечении, используемом в моделировании.

С отсутствием необходимых шаблонов и инструментов можно столкнуться при моделировании работы параметрического трансформатора, принцип действия которого основан на возникновении периодических колебаний в колебательном контуре при периодическом изменении индуктивности обмотки колебательного контура. Это явление ограничено используется в электротехнике, однако имеет преимущество при использовании в связке с устройствами, чувствительными к помехам. Достаточно подробно процесс возбуждения колебаний описан в трудах М. И. Парамонова [1]. Существуют множество конструкций ПТ (ПТ – параметрический трансформатор), принцип действия которых в основе своей остается неизменным, однако разные варианты конструкций имеют отличающиеся параметры магнитных цепей [2–4], что, в свою очередь, влияет на глубину модуляции и, как следствие, на потери.

Примеры различных конструкций ПТ показаны на рис. 1 – 2.

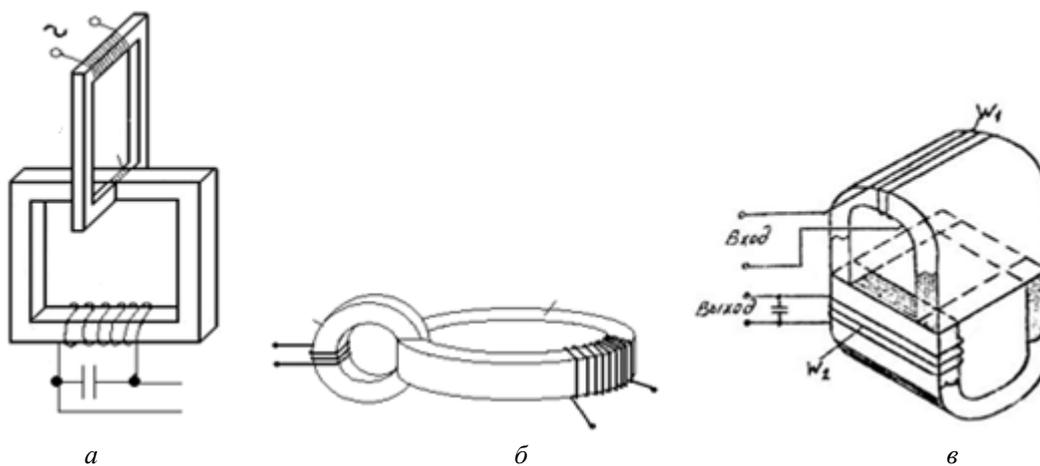


Рис. 1. Конструкции параметрических трансформаторов:
а – ПТ из двух стержневых сердечников; *б* – ПТ из двух тороидальных сердечников;
в – ортогонально-обмоточный ПТ

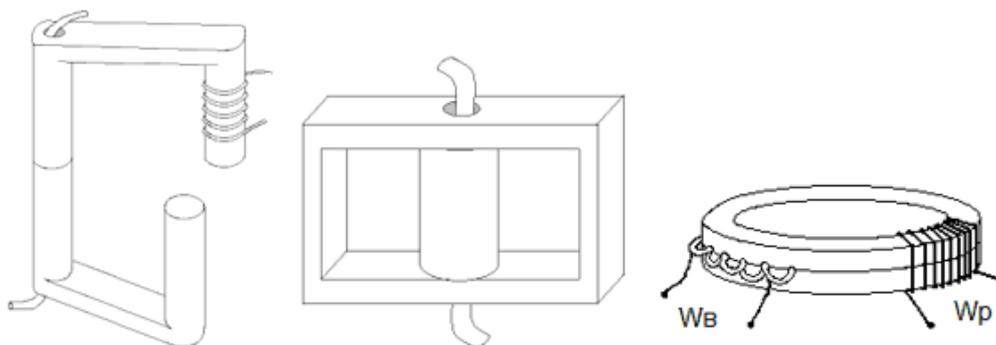


Рис. 2. Основные конструкции параметрических трансформаторов с ортогональными магнитными потоками

Ввиду вышеизложенного исследования в области параметрических трансформаторов являются актуальными. Существует необходимость в выявлении наиболее эффективного варианта конструкции ПТ, выявления возможных неучтенных потерь. Одним из наиболее простых и низко затратных способов исследования работы паратранса является математическое моделирование.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Моделирование ПТ нужно начинать с построения простейшей модели вторичной цепи, которая представляет собой параллельный колебательный контур. Упрощенную модель можно составить по результатам расчета параметров вторичной цепи. Расчет параметров ПТ это отдельная, достаточно объемная задача, которую раскрывать в данной статье нецелесообразно. Параллельный колебательный контур при резонансе в некоторой степени обладает свойством источника тока, поэтому напряжение будет сильно зависеть от нагрузки. Вторичную ПТ цепь можно рассчитывать как для обычного трансформатора, применяя вместо трансформаторной ЭДС параметрическую (если считать ее неизменной), а вместо изменяющейся индуктивности ее среднее значение, являющееся составной частью резонансной цепи. Это можно сделать в любой из программ схемотехнического моделирования. Составим схему модели ПТ в программе Electronics Workbench (рис. 3).

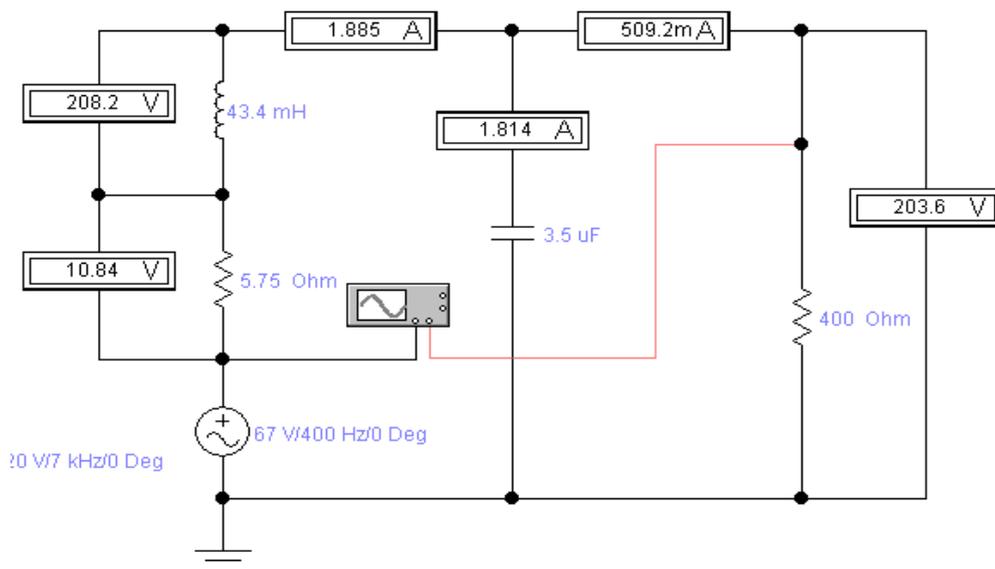


Рис. 3. Схема модели ПТ в EWB

Высокоомную нагрузку можно подключать непосредственно к резонансной цепи (рис. 4а), для подключения низкоомной нагрузки необходима дополнительная понижающая обмотка (рис. 4б). Если обмотки разделены на резонансную и нагрузочную, то для начального расчета двух обмоточную вторичную цепь нужно приводить к одно обмоточной. Напряжение выходной обмотки должно быть намного (или ненамного) меньше напряжения резонансной обмотки. Для них сечение и диаметр определяются отдельно, выходную обмотку рассчитываем как трансформаторную.

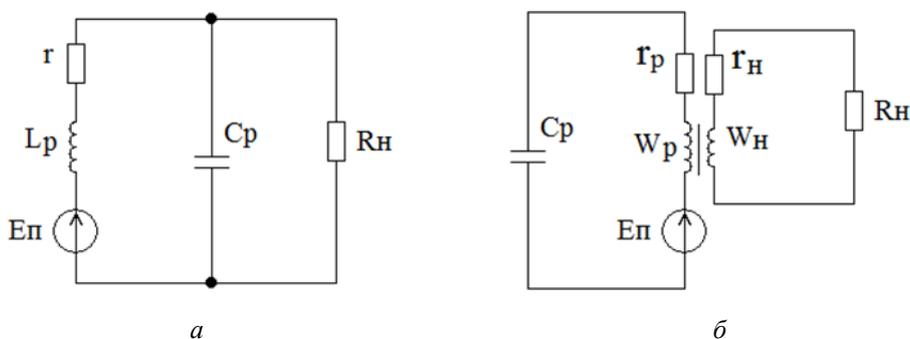


Рис. 4. Структурная схема:

а – резонансная цепь; б – понижающая обмотка

В ходе моделирования стало очевидно, что реактивная составляющая тока существенно превышает активную, и ток в индуктивности больше, чем все остальные токи (рис. 5). Это свидетельствует о том, что удельные массогабаритные показатели этого устройства будут хуже по сравнению с обычным трансформатором, т. к. объем сердечника определяется по полной мощности, а не по активной.

С помощью схемотехнической модели, схема которой приведена на рис. 3, можно получить представление лишь об установившемся процессе колебаний в ПТ. Эта модель не полностью отражает поведение ПТ, т. к. в ней нет элементов, моделирующих параметрическую ЭДС и не только. При упрощенном схемотехническом моделировании параметрическую составляющую ЭДС $I=dL/dt$ можно представить как источник напряжения, управляемый током, а обычную индуктивную составляющую ЭДС $L=dI/dt$ представить средним значением индуктивно-

сти. Токковый шум можно задать одним или несколькими источниками очень низкого напряжения большей частоты, чем резонансная. Параметрическая ЭДС прямо пропорционально зависит от тока, и поэтому может бесконтрольно возрастать. Это своего рода положительная обратная связь.

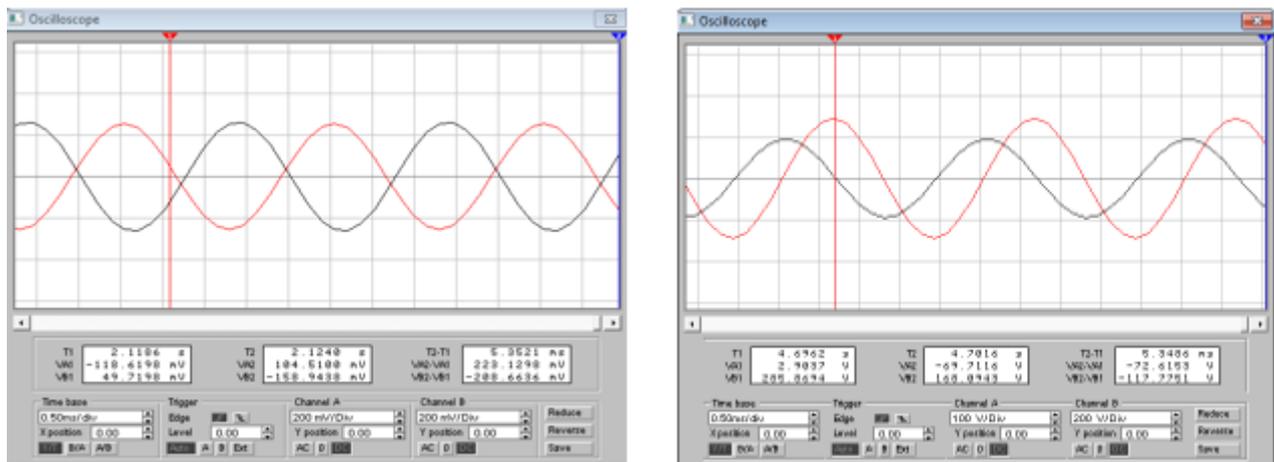


Рис. 5. Токи индуктивной и емкостной цепи, измеренные как падение напряжения на сопротивлении 0,1 Ом, осциллограммы параметрической ЭДС и напряжения на нагрузке

И действительно, при попытке моделирования таким образом модель или не возбуждалась, или уходила в разнос. В реальном ПТ резонанс более устойчив благодаря насыщению сердечника от векторной суммы первичной и вторичной МДС. Насыщение сердечника от суммарного вектора МДС является ограничивающим фактором для параметрической ЭДС, поэтому в схеме модели должен присутствовать ограничитель, возможно, даже нужно использовать управляемый ограничитель.

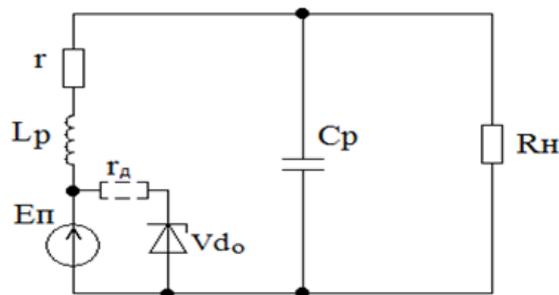


Рис. 6. Схема замещения ПТ с учетом ограничения параметрической ЭДС

Схема вторичной цепи ПТ и схема замещения вторичной цепи изображены на рис. 6. Функция ограничения параметрической ЭДС имитирована с помощью стабилитрона V_{do} . Сопротивление нагрузки и другие параметры необходимо задавать близкими к реальным из-за склонности модели к неустойчивости. Построим схему модели (рис. 7), и получим данные (рис. 8). С помощью созданных моделей удалось получить представление о работе ПТ лишь частично. Модель (рис. 3) и графики (рис. 5) достаточно точно показывают параметры паратранса в установившемся режиме, но не дают представления о динамике процессов. Модель (рис. 7) и графики (рис. 8) дают представление о динамике процессов возбуждения, по крайней мере, качественно, а для количественной оценки параметров нужно иметь более точные данные расчетов ПТ и более точную подстройку модели под конкретное устройство.

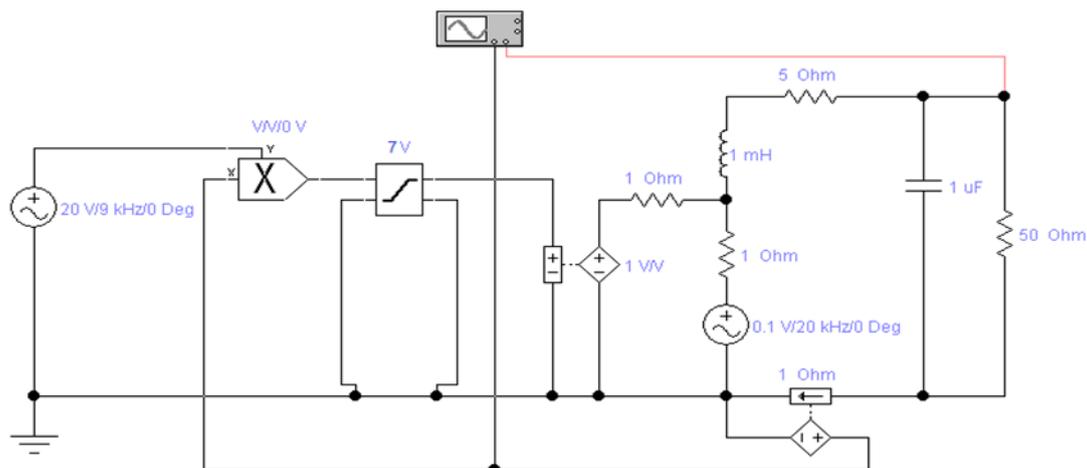
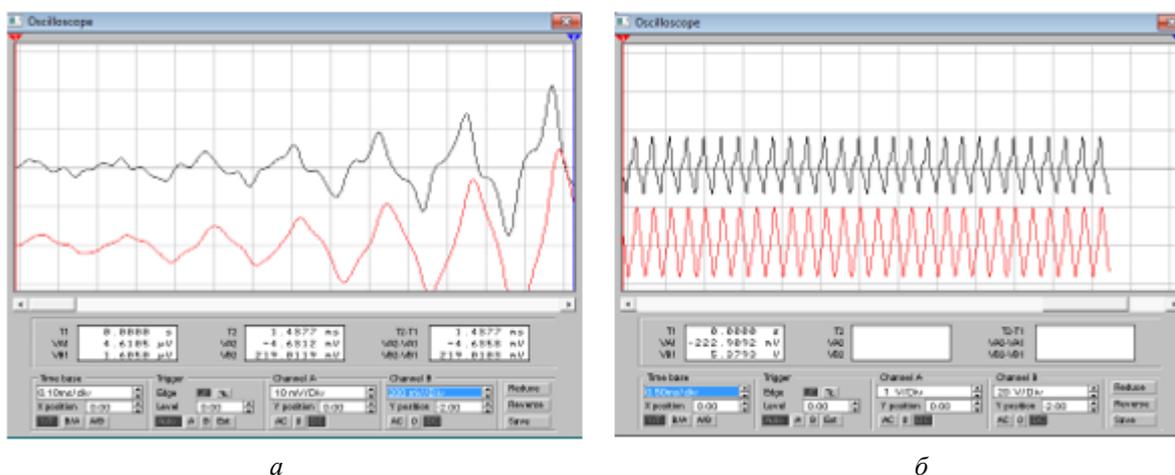


Рис. 7. Схема модели в EWB



а

б

Рис. 8. Графики, полученные в ходе моделирования:
– начало возбуждения; – установившийся режим

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании упрощенных моделей возникают трудности адаптации модели к поведению реального устройства. Осуществить настройку модели возможно, зная параметры реального устройства и имея в распоряжении более-менее адекватную модель. Ограничение параметрической ЭДС можно вычислить аналитически, но для построения адекватной модели ПТ нужно моделировать не только вторичную цепь, но и первичную, и определять их взаимодействие посредством магнитной проницаемости. Эта задача будет решена при более детальном моделировании.

В простейшем случае результат источника помещается в корневой элемент родительского документа в качестве дочернего элемента. В более сложной ситуации может потребоваться отыскать в родительском документе множество целевых элементов (*targs*) и продублировать результат источника внутри каждого из них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Парамонов М. И.** О процессах в нелинейных реактивностях, провоцирующих возникновение и накопление энергии при параметрическом резонансе// European Science. 2014. № 1.
2. **Агафонов А. И.** Параметрический трансформатор/Патент RU №2040058, МПК H01F27/28, G05F3/06, опубли. 20. 07. 1995.
3. **Стыркин А. В., Уразбахтина Н. Г., Терликова Н. С.** Параметрический трансформатор/Патент RU 116268 U1, МПК H01F 19/04, H01F 27, опубли. 20. 05. 2012.
4. **Парамонов М. И.** Патент на изобретение №2674009 RU, МПК H01F 29/14, опубли. 12. 04. 2018// Патент RU 116268 U1.

ОБ АВТОРАХ

ВЕРШИНИН Олег Юрьевич, маг. каф. ПИШ «Моторы будущего» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий». Дипл. Электроэнергетика и электротехника (УГАТУ, 2022).

METADATA

Title: Mathematical modeling of a parametric transformer

Authors: O.Y. Vershinin

Affiliation:

¹ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

E-mail: 072240@mail.ru,

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 3 (29), pp. 98–103, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The article deals with the modeling of parametric transformers and the problems that arise in this case. It is known that in parametric transformers, the principle of operation is based on a periodic change in the parameters of the oscillatory system, as a result of which difficulties arise when using standard tools for modeling electrical systems. Simulation was carried out using the Electronics Workbench program. Based on the results of the work carried out, conclusions were drawn, conditions were determined for the creation of more elaborate models of PT.

Keywords: parametric transformer; oscillatory circuit; depth of inductance modulation; parametric emf; Electronics Workbench.

About the authors:

VERSHININ Oleg Yurievich, magician. Department of AES "Motors of the Future" "Ufa University of Science and Technology". Diploma in Electrical Power Engineering and Electrical Engineering (USATU, 2022).