

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Веприк Ю. Н., Небера О. А.

*Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"**Предложен метод математического моделирования систем энергоснабжения неявными методами в фазных переменных.*

**Постановка проблемы.** Надёжность работы электрических систем, содержащих узлы с двигательной нагрузкой, в значительной мере зависит от безотказной работы электродвигателей. Тенденция роста единичной мощности синхронных двигателей и их доли в общей нагрузке узла электрической системы приводит к постоянному увеличению количества токов подпитки короткого замыкания от синхронных двигателей в общем токе короткого замыкания. Поэтому актуальны задачи определения достоверных токов короткого замыкания от двигательной нагрузки и ограничения токов коротких замыканий. К тому же, проблема поддержания электроустановок на достаточном эксплуатационном уровне зависит от правильного понимания происходящих в этих сетях процессов.

**Анализ последних исследований и публикаций** указывает на то, что возможности имеющихся программных средств, позволяющих воспроизводить либо только электромагнитную составляющую переходных процессов (периодические составляющие токов КЗ), либо только электромеханическую (в расчетах электромеханических переходных процессов при самозапуске электродвигателей) недостаточны для решения этих задач.

Кроме того, уравнения вращающихся электрических машин в фазных координатах в научной и учебной литературе приводятся, но применяются они, как правило, лишь для того, чтобы использовать их в качестве исходных для преобразований с целью перехода к другим системам координат. Возможности современных ЭВМ позволяют переходить к более полным и точным моделям, учитывающим емкостные и индуктивные параметры элементов, периодически изменяющиеся параметры вращающихся электрических машин, нелинейные характеристики защитных аппаратов и другие факторы. Но такие модели в настоящее время отсутствуют, а имеющиеся ориентированы на учёт ограниченного числа факторов и не могут обеспечить решение широкого круга задач.

**Цель статьи.** Предлагается алгоритм составления более точных и универсальных моделей как электрических систем, так и их отдельных элементов.

**Основные материалы исследования.** Компьютерные методы исследования переходных процессов в электрических системах основаны на составлении систем дифференциальных уравнений и их решении методами численного интегрирования.

Одним из факторов в пользу выбора неявных методов численного интегрирования для решения поставленных задач является то, что при этом

обеспечивается возможность полного структурного моделирования – т.е. разработки сначала моделей отдельных элементов сложной системы, а затем формирования модели системы в целом.

Для математического моделирования электромагнитных переходных процессов в элементах электрических систем принят неявный метод Эйлера-Коши, так как при этом обеспечиваются более высокие точность и устойчивость вычислительных процессов.

При разработке моделей элементов целесообразно выделить две группы элементов – статические элементы и вращающиеся электрические машины.

Алгоритмы моделирования переходных процессов в статических и вращающихся элементах представлены на рис. 1, 2.

В отличие от статических элементов, переходные процессы в электрических машинах имеют наряду с электромагнитной еще и электромеханическую составляющую, обусловленную изменениями скоростей вращения роторов и взаимного положения контуров, расположенных на статоре и роторе. Поэтому особенностями алгоритма моделирования переходных процессов в электрических машинах по сравнению со статическими элементами являются следующие:

– уравнения, отражающие электромагнитные переходные процессы в ЭМ, имеют ту же структуру, что и для статических элементов, поэтому в алгоритме содержатся элементы, обеспечивающие моделирование этих составляющих (блоки 5-8);

– электромеханические составляющие переходных процессов определяются уравнением движения роторов ЭМ, поэтому алгоритм дополнен блоком численного уравнения движения (блок 9) для определения изменений скоростей  $\omega(t)$  и углов  $\gamma(t)$ .

*Обобщенный алгоритм моделирования элементов. Программная реализация и тестирование.* Уравнения переходных процессов в воздушных или кабельных линиях имеют вид

$$[L]_{ij}^F \frac{d}{dt} [i]_{ij}^F + [R]_{ij}^F [i]_{ij}^F = [\Delta u]_i^F, \quad (1)$$

где  $L, R$  – матрицы собственных и взаимных индуктивностей и активных сопротивлений фаз линии.

Уравнения других статических элементов систем ЭСДН (трансформаторов, автотрансформаторов, элементов нагрузки), имеют такой же вид и отличаются

только порядком и структурой матриц параметров.

Уравнения электрических машин, если в них для выражения в скобках принять обозначение

$$\left( \omega \left[ \frac{dL}{d\gamma} \right] + [R] \right) = [R_1], \quad (2)$$

и записать их в виде

$$[L] \frac{d}{dt} [i] + [R_1] [i] = \begin{bmatrix} u_S \\ u_R \end{bmatrix}, \quad (3)$$

то можно сказать, что они аналогичны уравнениям статических элементов и отличаются тем, что элементы матриц индуктивностей фаз являются периодическими функциями времени.

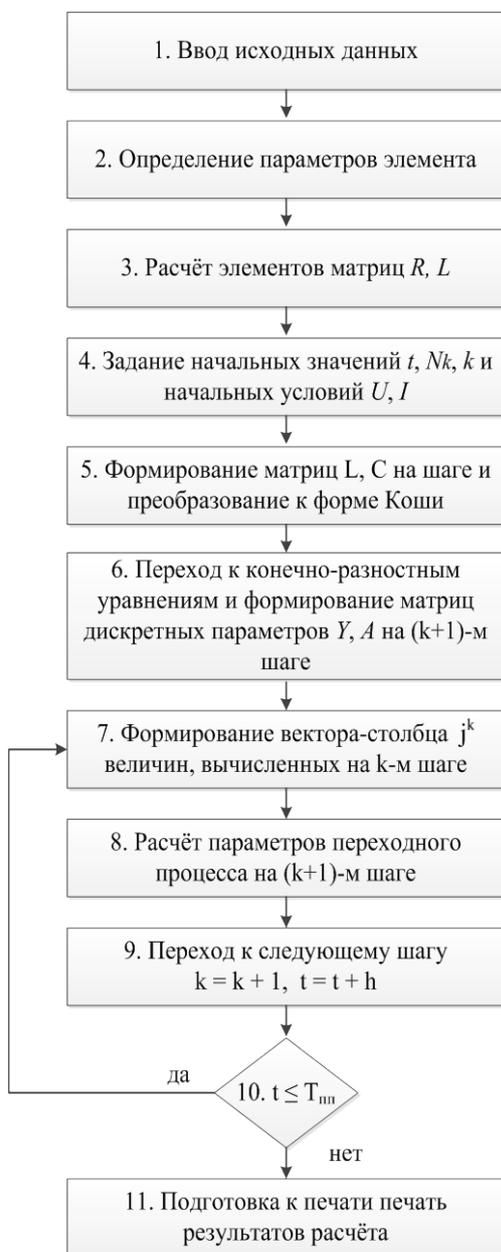


Рисунок 1 – Алгоритм моделирования переходных процессов в статических элементах

Поэтому алгоритмы моделирования переходных процессов в элементах систем энергоснабжения, можно рассматривать как модификации единого обобщенного алгоритма, основными элементами которого являются – расчет элементов исходных матриц  $R, L$ , формирование матриц дискретных параметров  $Y, A$ , расчет параметров переходного процесса на шаге, а для вращающихся электрических машин – численное интегрирование уравнений движения. Элементы исходных матриц и матриц дискретных параметров статических элементов неизменны в течение переходного процесса, поэтому на шаге численного интегрирования в цикле выполняются блоки 7, 8. Элементы матриц электрических машин являются периодическими функциями времени, зависят от их взаимного положения и скорости вращения ротора, вычисления этих параметров выполняются на каждом шаге вычислительного процесса, поэтому в цикле выполняются блоки 5 – 9.

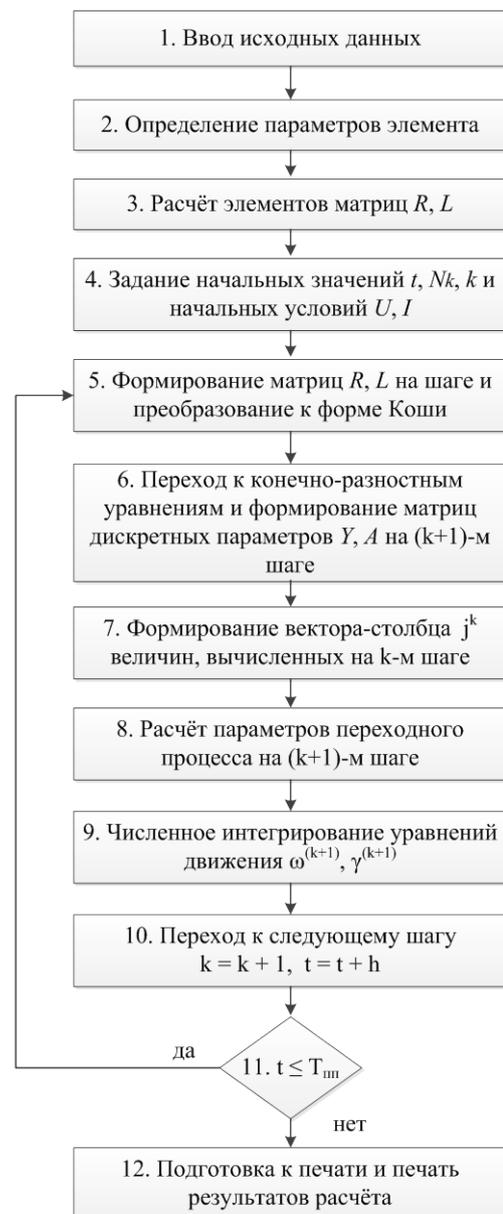


Рисунок 2 – Алгоритм моделирования переходных процессов в статических элементах

Программная реализация обобщенного алгоритма выполнена средствами алгоритмического языка Delphi, основные элементы алгоритма, соответствующие блокам 5 – 9, оформлены в виде соответствующих процедур, что позволяет сократить трудоемкость разработки программных средств.

Тестирование полученных программных средств подтверждает принципиальную возможность применения принятых для их реализации методов численного интегрирования, адекватность разработанных компьютерных моделей элементов и дает основания для использования их в моделях систем энергоснабжения.

Основные результаты моделирования для иллюстрации приведены ниже.

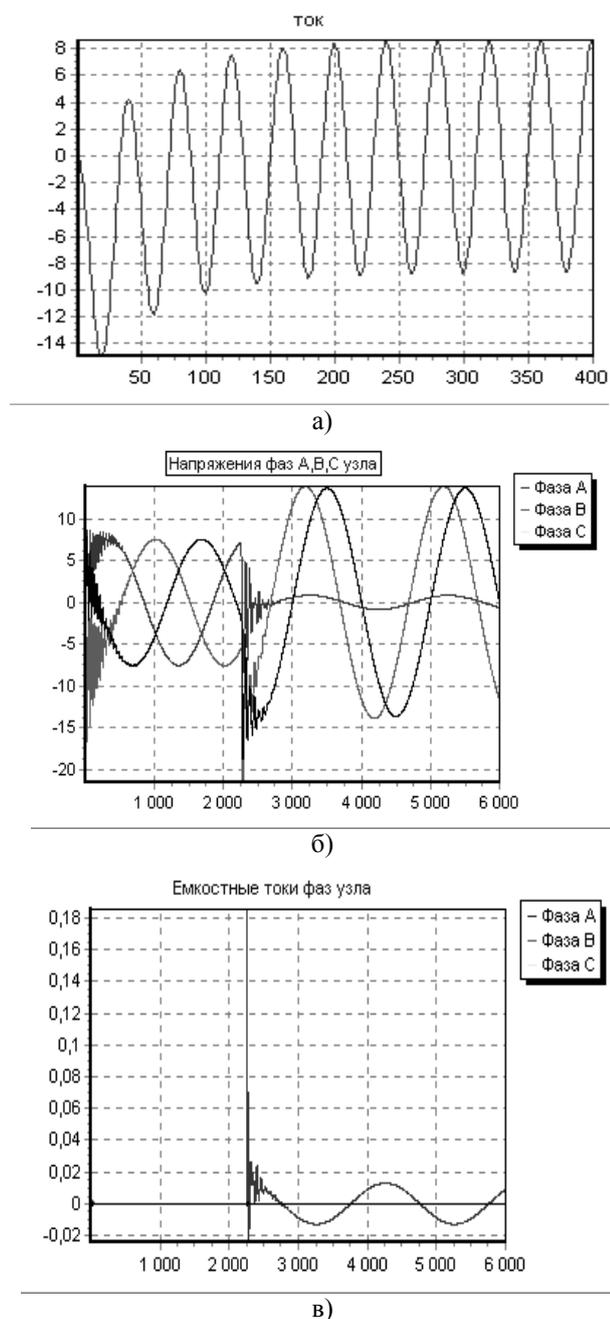


Рисунок 3 – Электромагнитные составляющие переходных процессов

При моделировании без учета поперечных емкостных параметров линий (рис. 3, а) воспроизводятся только принужденные (периодические) и аperiodические составляющие переходного процесса. Моделирование с учетом как продольных  $R, L$ , так и поперечных  $G, C$  параметров (рис. 3 б, в) отражает и высокочастотные свободные составляющие токов и напряжений.

Моделями синхронных и асинхронных машин воспроизводятся как электромагнитные составляющие (токи в статорных и роторных обмотках), так и электромеханические составляющие (скорости вращения, электромагнитные моменты) переходных процессов.

Приведенные примеры иллюстрируют возможности и особенности компьютерного моделирования переходных процессов:

- результаты расчета переходных процессов, выполненного средствами численного интегрирования, отражают как общую, качественную картину переходного процесса, так и его количественные характеристики (ударный и установившийся токи, кратности перенапряжений, время затухания электромагнитных и электромеханических составляющих переходного процесса и др.),

- при наличии компьютерной модели открывается возможность проведения многовариантных расчетов для исследования и изучения факторов, влияющих на количественные характеристики переходных процессов.

- полученный обобщенный алгоритм и принятая унифицированная форма записи уравнений элементов обеспечивают возможность применения структурных методов при разработке математической модели систем энергоснабжения в переходных режимах.

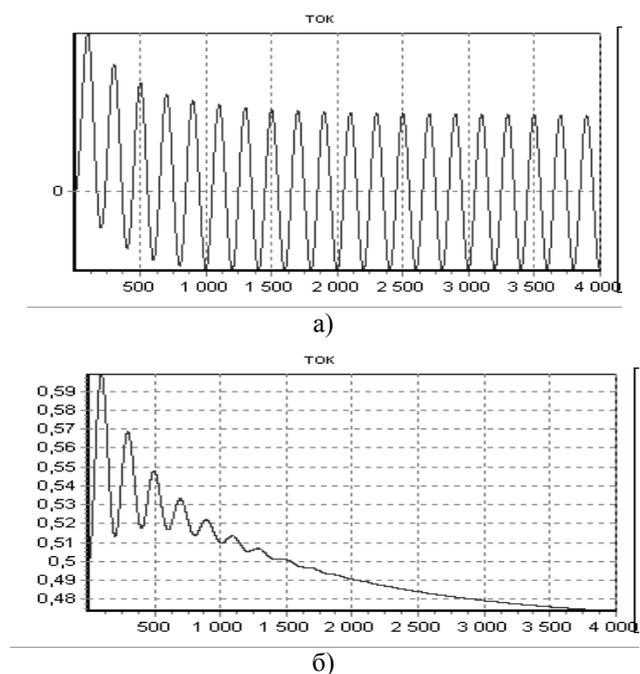


Рисунок 4 – Электромагнитные составляющие переходных процессов в ЭМ: а) токи фаз статора СМ; б) ток обмотки возбуждения

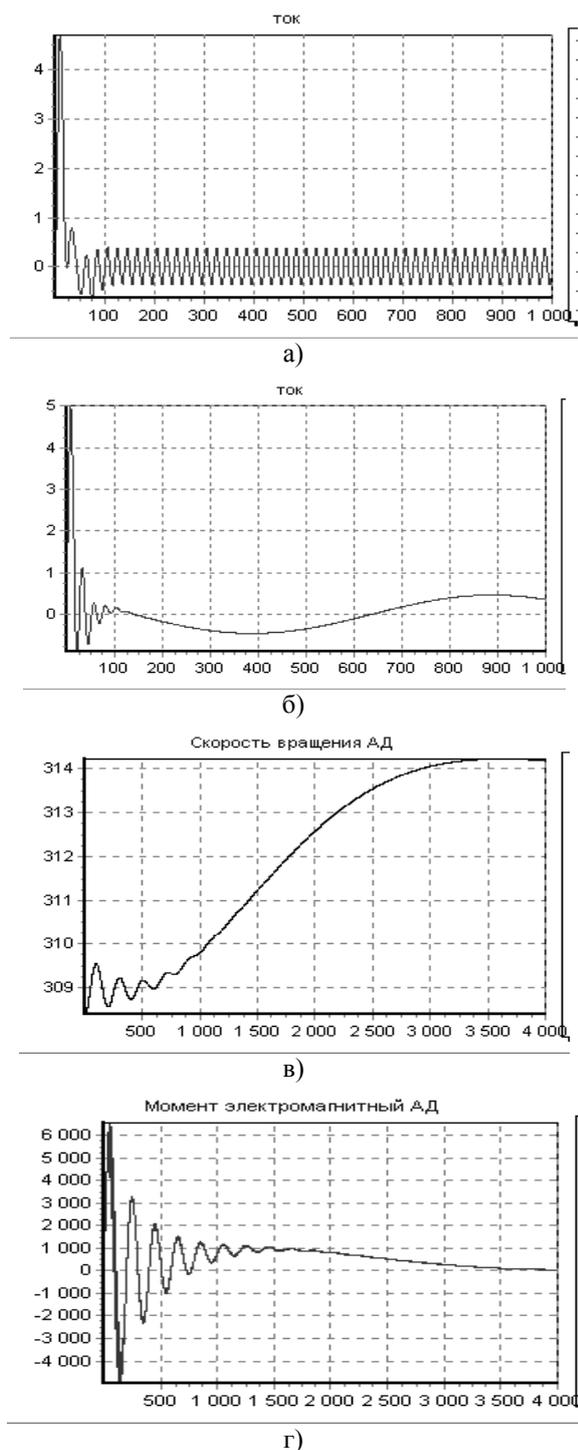


Рисунок 5 – Электромеханические составляющие переходных процессов в ЭМ: а) токи фаз статора АД; б) токи фаз ротора АД; в) скорость вращения АД; г) электромагнитный момент АД

**Выводы.** Традиционно развиваемые методы исследования электрических систем, основы которых разработаны еще в докомпьютерный период, ориентированы на физические и аналоговые модели и имеют ряд ограничений: по составу и точности представления элементов, по схемам соединения элементов, по кругу решаемых задач, по возможностям развития. По мере развития ЭВМ развиваются и математические модели электрических систем, но многие из

них представляют переложение на ЭВМ моделей, ориентированных на использование старых средств.

Математические модели электрических систем в переходных и установившихся режимах на основе уравнений в фазных координатах являются наиболее универсальными и обеспечивают решение широкого круга задач. Поэтому при разработке математических моделей систем энергоснабжения целесообразно использовать уравнения в фазных координатах.

Возможности современных ЭВМ позволяют переходить к более полным и точным моделям, учитывающим емкостные и индуктивные параметры элементов, периодически изменяющиеся параметры вращающихся электрических машин, нелинейные характеристики защитных аппаратов и другие факторы.

Выполненный анализ состояния методов и средств, применяемых в настоящее время для исследования режимов работы электрических систем, указывает на необходимость разработки как моделей отдельных элементов, так и общей методики формирования математических моделей трехфазных систем энергоснабжения произвольной структуры в фазных координатах.

#### Список использованных источников

1. Кобазев В. П. Амплітудні та фазові характеристики компенсованої мережі при однофазному замиканні на землю. Наукові праці Донецького національного університету, № 9(158) 2009.
2. Дударев Л. Е. Численный анализ феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью / Л. Е. Дударев, И. В. Волошек // Электрические станции. – 1991. – №4. – с.66-71.
3. Веприк Ю. Н. Базовая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией / Ю. Н. Веприк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №2. – с.37-42.

#### Анотація

#### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

Веприк Ю. М., Небера О. О.

*Запропоновано метод математичного моделювання систем енергопостачання неявними методами в фазних змінних.*

#### Abstract

#### THE MATHEMATICAL MODEL OF ELEMENTS OF ENERGY SUPPLY SYSTEMS

J. Veprik, O. Nebera

*An improved the method of mathematical modeling of energy supply systems by implicit methods based on the equations in the phase variables.*