

УДК 621.3

Н. И. Сиделев, кандидат техн. наук

### МАТРИЧНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ В ФОРМЕ КОШИ

**Аннотация.** В статье разработана математическая модель электромагнитных цепей с наибольшей степенью детализации как электрической, так и магнитной цепи. Магнитная цепь представляется так же подробно, как и электрическая, и описывается контурной матрицей. В математическом описании электромагнитных устройств индуктивные параметры определяются геометрическими размерами и характеристиками магнитопроводов. Топология электрической цепи представлена матричными блоками, что позволяет учитывать одновременно распределение токов и зарядов в элементах схемы. Система уравнений приведена к форме Коши, что упрощает ее решение численными методами на ЭВМ. Приведен алгоритм и пример моделирования электрической схемы с трансформатором и сравнение результатов с моделью в Matlab/Simulink/SimPowerSystems.

**Ключевые слова:** электрическая цепь, магнитная цепь, статические электромагнитные устройства, топологически-изоморфное моделирование, матрично-топологическое описание, топологические матрицы, матрицы инцидентий, блочная структура топологической матрицы, матрица витковых зацеплений, вторичные источники питания, генераторы импульсных токов.

М. І. Сіделев, кандидат техн. наук

### МАТРИЧНО-ТОПОЛОГІЧНИЙ ОПИС ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КІЛ У ФОРМІ КОШІ

**Анотація.** У статті розроблена математична модель електромагнітних кіл з найбільшою ступінню деталізації як електричного, так і магнітного кола. Магнітне коло представляється так само детально, як і електричне, і описується контурною матрицею. У математичному описі електромагнітних пристроїв індуктивні параметри визначаються геометричними розмірами і характеристиками магнітопроводів. Топологія електричного кола представлена матричними блоками, що дозволяє враховувати одночасно розподіл струмів і зарядів в елементах схеми. Система рівнянь приведена до форми Коші, що спрощує її рішення чисельними методами на ЕОМ. Наведено алгоритм і приклад моделювання електричної схеми з трансформатором і порівняння результатів з моделлю в Matlab / Simulink / SimPowerSystems.

**Ключові слова:** електричне коло, магнітне коло, статичні електромагнітні пристрої, топологічно-ізоморфне моделювання, матрично-топологічний опис, топологічні матриці, матриці інцидентій, блокова структура топологічної матриці, матриця виткових зачеплень, вторинні джерела живлення, генератори імпульсних струмів.

N. I. Siddelev, PhD

### MATRIX-TOPOLOGICAL DESCRIPTION OF ELECTROMAGNETIC CIRCUITS IN THE FORM CAUCHY

**Abstract.** In the article the mathematical model of the electromagnetic circuit with the highest level of detail both electric and magnetic circuit. The magnetic circuit is represented in the same detail as electric, and is described by the contour matrix. The mathematical description of electromagnetic induction device parameters are determined by the geometrical dimensions and characteristics of the magnetic cores. The topology of circuit blocks represented by the matrix that takes into account both current and charge distribution in the circuit elements. The system of equations is reduced to the Cauchy form that facilitates its solution by numerical methods on computers. The algorithm and an example of simulation circuitry with transformer and comparing the results with the model in Matlab / Simulink / SimPowerSystems.

**Keywords:** electric circuit, magnetic circuit, static electromagnetic device, topologically isomorphic modeling, matrix-topological description, topological matrix, incidence matrix, the block structure of the topological matrix, the matrix interturn links, secondary power supplies, pulse current generators.

**Введение.** Компьютерное моделирование электротехнических и электронных устройств и сегодня играет особую роль в проектировании экономичных и в техническом плане эффективных приборов различного назначения. Оно позволяет не только ускорить расчетные работы и улучшить ка-

чество проектирования, но и создает благоприятные условия для развития теории моделирования энергоемких частей преобразователей электроэнергии.

При расчете энергоемкости электромагнитных цепей (ЭМЦ) очень важно выбрать

метод, позволяющий точно оценить накопление и потери энергии в элементах схемы. Это может повлиять на конечный результат исследования, например, коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент мощности и т.д.

Сложность исследования нелинейных электрических и магнитных цепей состоит в том, что не существует в настоящее время общих аналитических решений систем нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений. Принято считать, что анализ существенно нелинейных цепей, за исключением небольшого числа простейших случаев, можно выполнить только численным способом [1,4,8,11].

Матрично-топологические методы в настоящее время широко используются для исследования электромагнитных цепей различного назначения [16,17,18,19,20,21]. Еще в конце 80-х доцент Николаевского кораблестроительного института Краснов В.В. предложил описывать электромагнитные устройства так, чтобы индуктивные параметры определялись геометрическими размерами и характеристиками магнитопроводов [10]. Топология электрической цепи представляется матричными блоками  $A_c, A_o, A_{cr}, A_r$ :

$$A = \begin{bmatrix} A_c & A_{cr} \\ A_o & A_r \end{bmatrix},$$

где блоки матрицы – это матрицы инцидентий:

$A_c$  – заходов ветвей графа емкостной части электронной схемы;

$A_o$  – исходов ветвей графа емкостной части электронной схемы;

$A_{cr}$  – здесь резистивные ветви инцидентны с емкостными;

$A_r$  – здесь резистивные ветви не инцидентны с емкостными.

Это позволило "сконструировать" математическое описание, учитывающее одновременно распределение токов и зарядов в элементах схемы:

$$I = Y[A_r^t V_r + A_{cr}^t (V_c - A_c A_o^t V_r) + E - W^t \Phi']; \quad (1)$$

$$WI = \Gamma_m R_m \Gamma_m^t \Phi; \quad (2)$$

$$A_c C A_c^t V_c' = -A_{cr} I; \quad (3)$$

$$A_r I - A_o A_c^t A_{cr} I = 0, \quad (4)$$

где:  $I, V, E, \Phi$  – соответственно векторы-столбцы токов, потенциалов, ЭДС, магнитных потоков в ветвях и узлах электромагнитной схемы;

$Y, C$  – матрицы проводимостей и емкостей электрической части схемы;

$R_m$  – диагональная матрица магнитных сопротивлений;

$\Gamma_m$  – матрица инцидентий магнитной части схемы;

$W$  – матрица витковых зацеплений электрической части схемы с магнитной.

Таким образом в работе [9] получено математическое описание электромагнитных устройств (1)-(4), в котором индуктивные параметры определяются геометрическими размерами и характеристиками магнитопроводов. Матричная форма представления электромагнитной системы идеально подходит к реализации модели на электронно-вычислительных машинах с использованием пакетов прикладных программ, например, MATLAB, в котором все объекты вычисления представлены матрицами [14].

В матрично-топологическом описании (1)-(4) матрица магнитных сопротивлений  $R_m$  определяется нелинейными характеристиками электротехнических сталей, используемых в трансформаторах и дросселях ВИП. Значения элементов матрицы проводимостей  $Y$  для вентильных схем изменяются в зависимости от проводящего состояния полупроводниковых диодов. В связи с этим для решения системы (1)-(4) возможно применение только численных методов.

Обилие в ней переменных состояния:  $I, \Phi, \Phi', V_c, V_c', V_r$  - затрудняет решение, кроме того, требует использования специальных итерационных методов.

Итерационные методы решения систем дифференциальных уравнений хорошо исследованы в работах [7,13 и др.] и успешно используются при численном исследовании нелинейных систем [2,3,10]. Делались попытки разработать оригинальные простые быстродействующие методы [15], однако проблемы размерности задач, алгоритмические сложности на шаге итераций и их числа остаются.

В нашем случае применение итерационных методов исследования было бы не эффективным, так как поставленная задача - исследование энергетики, в частности учет рассеивания и накопления электрической энергии на каждом элементе схемы, - требует дополнительных вычислительных затрат машинного времени ЭВМ [5].

Кроме этого для моделирования нелинейных магнитных характеристик материалов требуется разработка специальных моделей, которые следует включить в общий алгоритм исследования цепей.

На основании вышеизложенного машинное время необходимо экономить, а это достигается использованием явных методов численного интегрирования, основные достоинства которых описаны в [6].

Данная статья является продолжением статьи, представленной в 11 выпуске научно-технического журнала «Электротехнические и компьютерные системы» [9].

**Приведение топологически-изоморфного описания ЭМЦ к форме, удобной для решения численными методами.** При разработке математической модели на ЦВМ с использованием явных методов численного интегрирования необходимо систему (1)-(4) разрешить относительно производных векторов магнитных потоков  $\Phi'$  и напряжений на конденсаторах  $V_c'$ .

Для этого выполним матричные преобразования следующим образом. Перегруппируем члены в (1) следующим образом:

$$I = Y[(A_r^t - A_{cr}^t A_c A_o^t) V_r + A_{cr}^t V_c + E - W^t \Phi'] \quad (5)$$

Введем новую топологическую матрицу:

$$A_Y^t = A_r^t - A_{cr}^t A_c A_o^t,$$

тогда

$$A_Y = A_r - A_o A_c^t A_{cr}.$$

Если, подставим выражение (5) в (4), тогда получим:

$$A_Y Y A_Y^t V_r + A_Y Y (A_{cr}^t V_c + E - W^t \Phi') = 0.$$

Отсюда можно получить  $V_r$ , чтобы исключить его из уравнения (5):

$$V_r = [A_Y Y A_Y^t]^{-1} A_Y Y (W^t \Phi' - A_{cr}^t V_c - E).$$

Исключим вектор  $V_r$  из уравнения (5) и получим:

$$I = Y A_Y^t [A_Y Y A_Y^t]^{-1} A_Y Y (W^t \Phi' - A_{cr}^t V_c - E) - Y (W^t \Phi' - A_{cr}^t V_c - E). \quad (6)$$

Введем матрицу активных параметров:

$$Y_r = Y[\epsilon - A_{cr}^t [A_Y Y A_Y^t]^{-1} A_Y Y],$$

где  $\epsilon$  - единичная матрица.

Тогда уравнение (6) примет вид:

$$I = Y_r (A_{cr}^t V_c + E - W^t \Phi'). \quad (7)$$

Таким образом, мы получили уравнение в форме узловых потенциалов, где все потенциалы графа электрической цепи определены через потенциалы на емкостях в емкостном подграфе.

Исключим вектор  $I$  в описании (1)-(4) подстановкой (7) в (2) и (3), что дает:

$$W Y_r (A_{cr}^t V_c + E - W^t \Phi') = \Gamma_m R_m \Gamma_m^t \Phi.$$

Отсюда определим производную магнитного потока:

$$\Phi' = [WY_r W^t]^{-1} [WY_r (A_{cr}^t V_c + E) - F], \quad (8)$$

где  $F = \Gamma_m R_m \Gamma_m^t \Phi$ .

Вектор  $F$  может быть определен и таким образом:

$$F = \Gamma_m L H,$$

где  $L$  – матрица длин магнитопроводов;  $H$  – вектор-столбец магнитной напряженности в стержнях.

Подставим уравнение (7) в (3):

$$A_c C A_c^t V_c' = -A_{cr} Y_r (A_{cr}^t V_c + E - W^t \Phi')$$

Выделим производную вектора электрических потенциалов на емкостях:

$$V_c' = [A_c C A_c^t]^{-1} A_{cr} Y_r (W^t \Phi' - A_{cr}^t V_c - E). \quad (9)$$

Таким образом, система (1)-(4) разрешена относительно производных векторов  $\Phi'$  и  $V_c'$ . Система (8)-(9) представляет собой новое описание электромагнитной цепи, разрешенное относительно магнитных потоков и электрических потенциалов на конденсаторах. Особенностью такого описания является то, что оно позволяет моделировать идеальные электромагнитные цепи, так как не обладает избыточностью. Известны другие частные случаи расчета таких цепей, например, в [12]. В них идеальные трансформаторы рассматриваются как дополнительные структурные уравнения. Однако это приводит к усложнению математической модели. В нашем же случае существенно сокращается размерность задачи. Система (8)-(9) записана в форме Коши и пригодна к исследованию явными методами численного интегрирования.

**Вычислительный алгоритм программы в соответствии с математическим описанием электромагнитной цепи.** В данном параграфе представлена укрупненная блок-схема алгоритма программы в программной

среде MATLAB (рис.1) и описаны основные назначения блоков алгоритма.

Блок 1. Ввод параметров процесса моделирования: время (Time) и шаг (h) моделирования.

Блок 2. Ввод параметров схемы:

- матрица активных сопротивлений (R);
- матрица емкостей конденсаторов (C);
- матрица заходов дуг емкостного графа (Ac);
- матрица исходов дуг емкостного графа (Ao);
- матрица инцидентности резистивного и емкостного графов (Acg);
- матрица инцидентности чисто резистивного графа (Ar);
- матрица сопротивлений ветвей магнитопроводов (Rm);
- матрица инцидентности магнитопроводов (Gm);
- матрица витковых зацеплений магнитной и электрической части схемы (W).

Блок 3. Цикл повторяющейся части алгоритма в пределах интервала моделирования.

Блок 4. Вычисление вектора ЭДС источников электроэнергии (E).

Блок 5. Вычисление вектора намагничивающих сил (F), производной вектора магнитных потоков ( $\Phi'$ ) и их приращений ( $\Delta\Phi$ ).

Блок 6. Вычисление вектора токов (I), производной вектора электрических потенциалов на конденсаторах ( $V_c'$ ) и их приращений ( $\Delta V_c$ ).

Блок 7. Изменение векторов магнитного потока ( $\Phi$ ) и электрических потенциалов на конденсаторах ( $V_c$ ) на величину их приращения  $\Delta\Phi$  и  $\Delta V_c$ .

Блок 8. Вывод графиков переменных состояния: I,  $V_c$ ,  $\Phi$ .

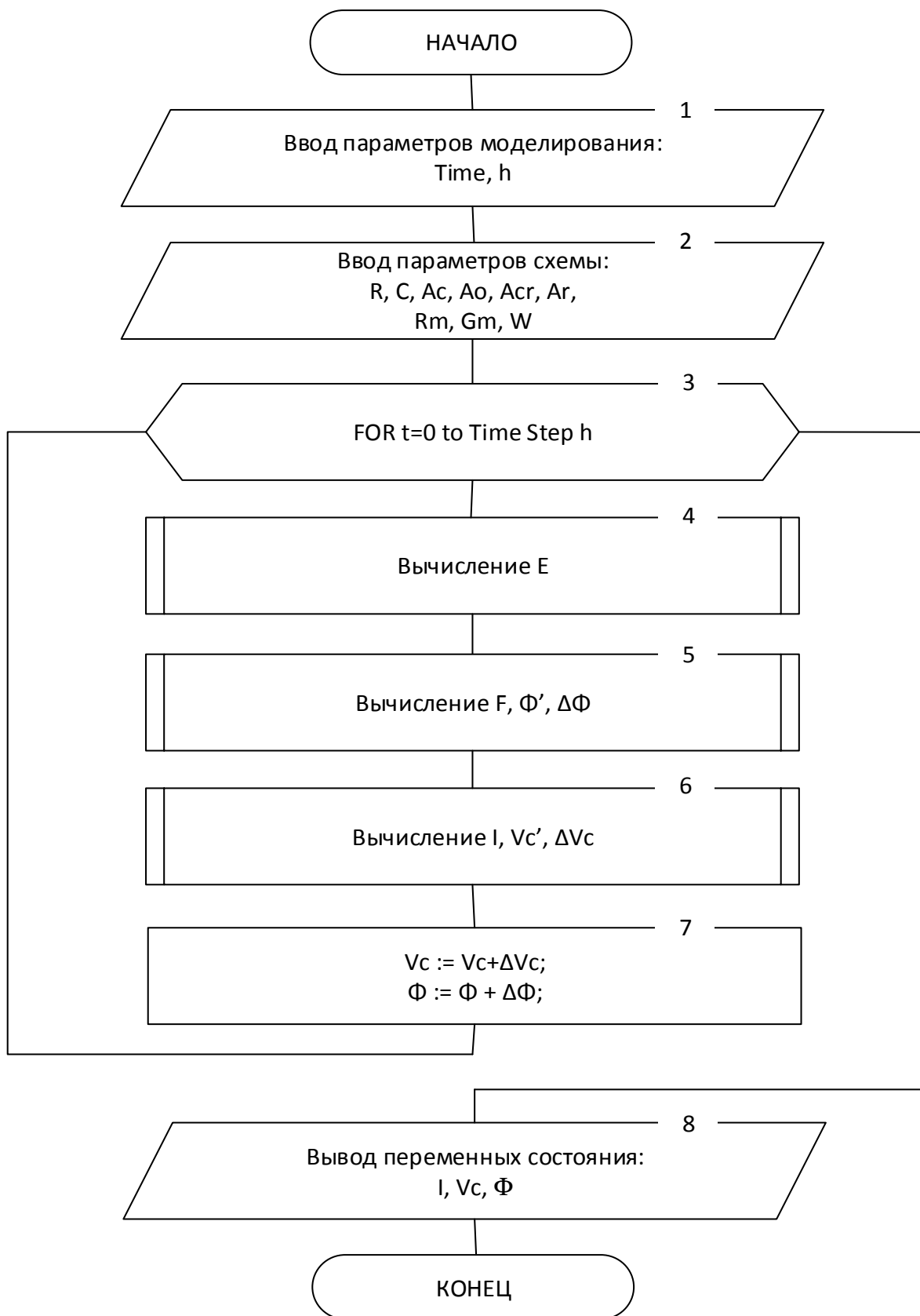


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы



В результате моделирования электромагнитной цепи получены следующие эпюры тока, магнитного потока и электрического потенциала (см. рис.3):

- эпюра напряжения источника ЭДС  $E_1$ ;
- эпюра магнитного потока  $\Phi$ ;
- эпюра тока в резисторе  $R_4$ ;
- эпюра напряжения на конденсаторе  $C_2$ .

Start time: 0 с.;  
 Stop time: 0.06 с.;  
 Type: Fixed-step;  
 Fixed-step size: 0.000000001;  
 Solver: ode14x (extrapolation);  
 Extrapolation order: 4;

Параметры линейного трансформатора приняты следующие: Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]: [250 50]; Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]: [220 0 0]; Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu)

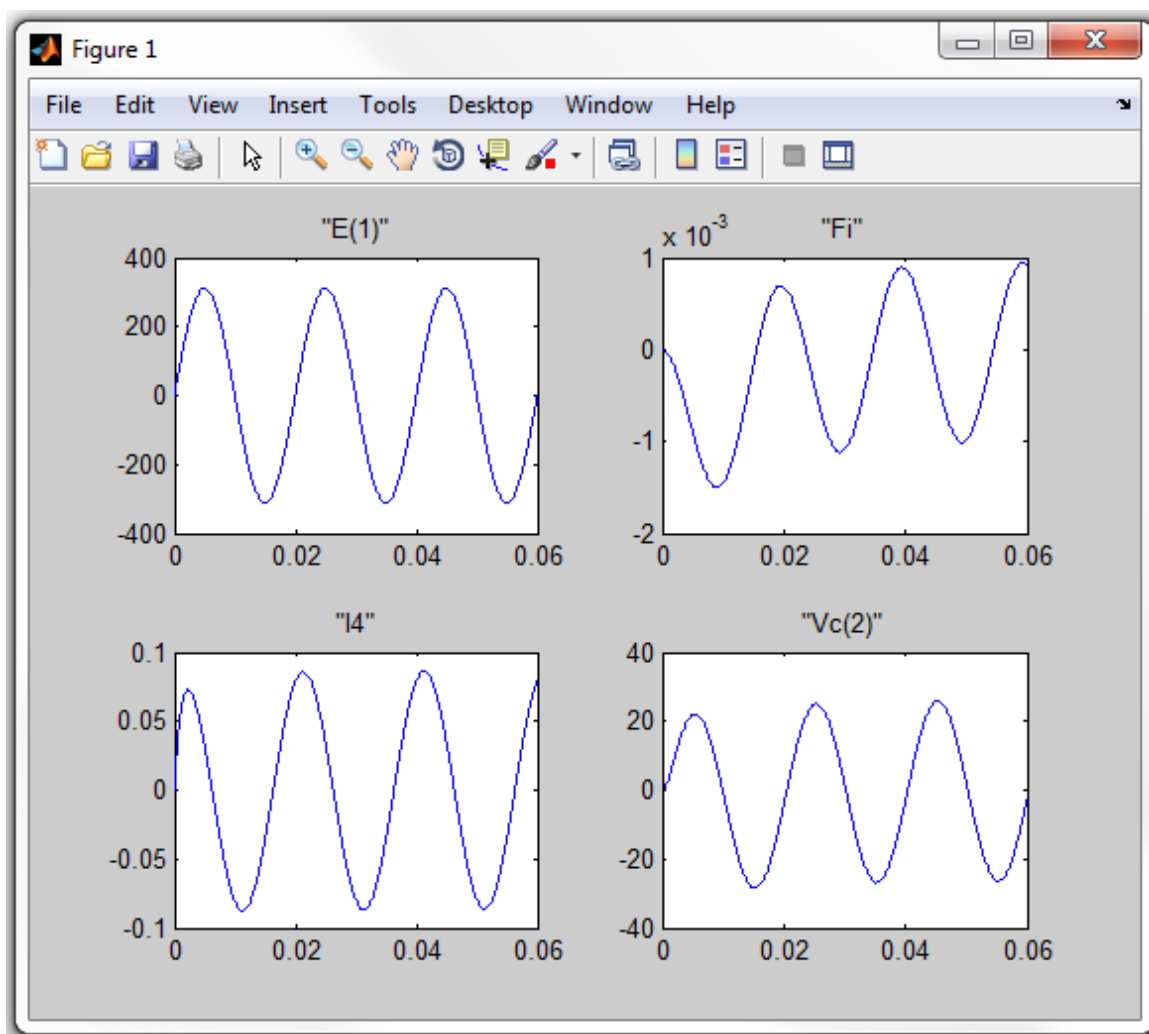


Рис. 3. Эпюры сигналов в моделируемой цепи

Для проверки математической и соответствующей ей программной модели составлена модель в Matlab/Simulink/SimPower Systems (см. рис.4).

Здесь были приняты следующие параметры моделирующего процесса (Configuration Parameters):

L2(pu): [22 0 0]; Magnetization resistance and inductance [Rm(pu) Lm(pu)]: [500 500].

В результате моделирования получены эпюры сигналов (рис.5), в первом приближении похожие на эпюры (рис.3). В отличие от осциллограмм сигналов на рис.5 на эпюрах рис.3 замечен переходный процесс.

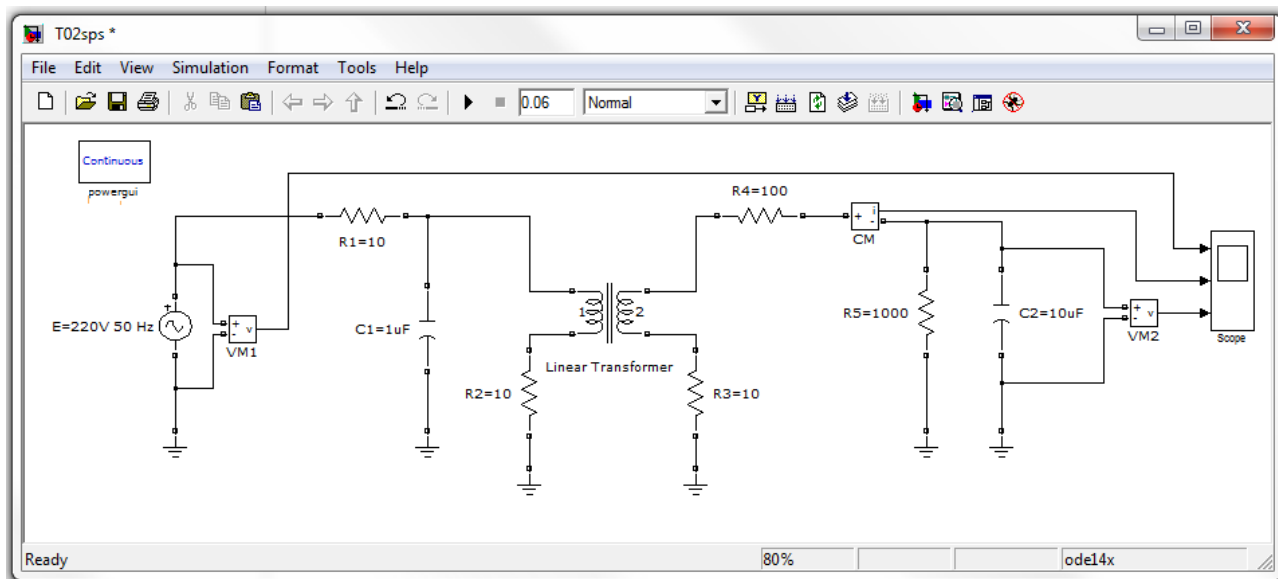


Рис. 4. Модель электромагнитной схемы (рис.2) в Matlab/Simulink/SimPowerSystems

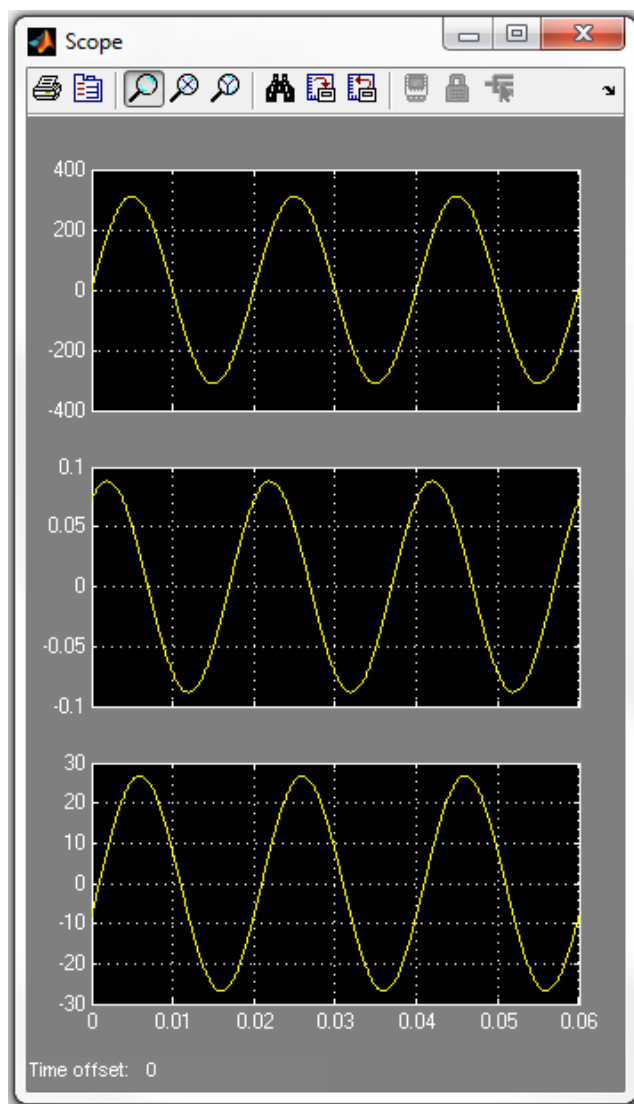


Рис. 5. Осциллограммы модели (рис.4) в Matlab/Simulink/SimPowerSystems

**Выводы.** Математическое описание (1)-(4) преобразовано к форме Коши и разрешено относительно производных магнитных потоков и электрических потенциалов на конденсаторах (8)-(9).

Топология электрической цепи представлена матричными блоками, которые учитывают одновременно распределение токов и зарядов в элементах схемы.

Индуктивные параметры системы определяются геометрическими размерами и характеристиками магнитопроводов.

Матричная форма представления электромагнитной системы идеально подходит к реализации модели на электронно-вычислительных машинах с использованием пакетов прикладных программ, например, MATLAB, в котором все объекты вычисления представлены матрицами.

Исходя из данной структуры математического описания структуры ЭМЦ, предложенную модель целесообразно использовать для исследования устройств, имеющих в своем составе магнитопроводы достаточно мощные, чтобы их учитывать. Данная модель использовалась для исследования вторичных источников питания и мощных генераторов токов.

#### Список использованной литературы:

1. Андреев В. О. Теория нелинейных электрических цепей: Учебное пособие для вузов [Текст] / В. О. Андреев - М.: Радио и связь, 1982. - 280 с.
2. Блинцов В. С. Особенности цифрового моделирования динамики генераторов импульсных токов [Текст] / В. С. Блинцов, Н. И. Сиделев // Совершенствование средств автоматизации и механизации технологических процессов. - Николаев, 1982. С. 67-68.
3. Блинцов В. С. Применение метода неявных функций для цифрового моделирования систем с вентиляемыми преобразователями [Текст] / В. С. Блинцов, Н. И. Сиделев // Труды НКИ, 1982, Вып. 190. С. 97-100.
4. Бондаренко В. М. Вопросы анализа нелинейных цепей [Текст] / В.М. Бондаренко - Киев: Наукова думка, 1967. - 160 с.

5. Карни Ш. Теория цепей. Анализ и синтез: Пер. с англ. [Текст] / Ш. Карни // Под ред. С.Е. Лондона - М.: Связь, 1973. - 368 с.

6. Коган В. Л. Алгоритм расчета схем в базисе узловых потенциалов с применением явных методов интегрирования [Текст] / В. Л. Коган - Изв. вузов: Радиоэлектроника, 1982, № 6. - С. 9-12.

7. Коллатц Л. Функциональный анализ и вычислительная математика [Текст] / Л. Коллатц - М.: Мир, 1969. - 448 с.

8. Копылов И. П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах (электрические машины) [Текст] / И. П. Копылов - М.: Высшая школа, 1980. - 256 с.

9. Краснов В. В. Матрично-топологичний опис електромагнітних кіл [Текст] / В. В. Краснов, М. І. Сиделев // Електротехнічні та комп'ютерні системи, вип. 11 (87). - К.: «Техніка», 2013. - С. 66-73.

10. Краснов В. В. Топологически-изоморфное моделирование электромагнитных цепей [Текст] / В. В. Краснов, Н. И. Сиделев // Электрооборудование судов. Сб. науч. тр. Николаев, 1984. - С. 3-9.

11. Матханов П. Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи: Учебник для студентов электротехн. спец. вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / П. Н. Матханов - М.: Высшая школа, 1986. - 252 с.

12. Мустафа Г. М. Программа для расчета цепей с идеальными трансформаторами [Текст] / Г. М. Мустафа, Ю. Б. Федотов // Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1983, №5. - С. 3-5.

13. Ортега Дж. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными: Пер. с англ. [Текст] / Дж. Ортега, В. Рейнболдт - М.: Мир, 1975. - 560 с.

14. Рябенский В. М. Основи моделювання систем і процесів в електротехніці (Використання пакета прикладних програм MATLAB/Simulink) / В. М. Рябенский, С.В. Драган, Л. В. Солобуто - Навчальний посібник [Текст] / Під ред. проф. В.М. Рябенського. - Львів: Новий світ - 2000, 2008. - 385с

15. Сиделев Н. И. Об управлении итерационными вычислениями при моделировании физических процессов [Текст] / Н. И. Сиделев // Труды НКИ, 1982, Вып. 190. С. 36-39.

16. Alotto P. a. Topological equations [Text] / [P. a. Alotto, F. b. Freschi, M. b. Repetto and others] // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2013. – 230. – P. 11–20. DOI : 10.1007/978-3-642-36101-2-2

17. Deskur Jan. Models of magnetic circuits and their equivalent electrical diagrams [Text] / Jan Deskur // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering – 1999. - Vol. 18. – Iss. 4. - P.600 – 610.

18. Kirawanich P. a. Electromagnetic topology quasisolutions for aperture interactions using transmission line matrix [Text] / [P. a. Kirawanich, D. A. Gleason, S. J. b. Yakura and others] // Journal of Applied Physics, art. no. 044910. – 2006. – 99 (4). DOI : 10.1063/1.2173690.

19. Ortner M. G. Solver for a Magnetic Equivalent Circuit and Modeling the Inrush Current of a 3-Phase Transformer [Text] / M. G. Ortner, Magele Christian, and Klaus Krischan // World Academy of Science, Engineering and Technology. -2010. - Vol. 40.

20. Parmantier J. P. EM topology: From theory to application [Text] / J. P. Parmantier // Ultra-wideband, Short-pulse Electromagnetics, 7. – 2007. - P.3-12.

21. Tesche F. M. EMC Analysis Methods and Computational Models [Text] / F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson // John Wiley & Sons Inc, New York. – 1997. - 656 p.

Получено 20.11.2015

## References

1. Andreev, V.S. (1982), “Теорія нелінійних електричних кіл: Учебное пособие для вузов” [The theory of non-linear electric circuits: A manual for schools], Radio i svjaz' Publ., Moscow, USSR, 280p. (In Russian).

2. Blintsov, V.S. and Siddelev, N.I. (1982), “Особенности цифрового моделирования

динаміки генераторів імпульсних токів” [Features of a digital simulation of the dynamics of pulse current generators], *Sovershenstvovanie sredstv avtomatizacii i mehanizacii tehnologicheskikh processov*, Nikolaev, Ukraine, pp. 67-68. (In Russian).

3. Blintsov, V. S. and Siddelev, N. I. (1982), “Применение метода неявных функций для цифрового моделирования систем с вентилями преобразователями” [Application of a method of implicit functions for digital modeling of systems with rectifier converters], *Nikolaevskij korablestroitel'nyj institute Publ.*, Nikolaev, Ukraine, Vol. 190, pp. 97-100. (In Russian).

4. Bondarenko, V. M. (1967), “Вопросы анализа нелинейных цепей” [Questions analysis of nonlinear circuits], *Naukova Dumka Publ.*, Kiev, Ukraine, 160 p. (In Russian).

5. Carney, S. (1973), “Теорія кіл. Аналіз і синтез: Пер. з англ.” [Circuit theory. Analysis and Synthesis: Trans. from English], in London, S.E., (Ed.), Svjaz' Publ., Moscow, USSR, 368 p. (In Russian).

6. Kogan, V. L. (1982), “Алгоритм расчета схем в базисе узловых потенциалов с применением явных методов интегрирования” [The algorithm for calculating schemes in the basis of nodal potentials using the explicit methods of integrating], *Izvestija vuzov: Radioelektronika*, Vol. 6, pp. 9-12. (In Russian).

7. Collatz, L. (1969), “Функциональный анализ и вычислительная математика” [Functional analysis and computational mathematics], *Mir Publ.*, Moscow, USSR, 448 p. (In Russian).

8. Kopylov, I.P. (1980), “Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах (электрические машины): Учебник” [The use of computers in engineering and economic calculations (electric machines): Textbook], *Vysshaja shkola Publ.*, Moscow, USSR, 256 p. (In Russian).

9. Krasnov, V. V. and Siddelev, N. I. (2013), “Матрично-топологичный опис электромгнитных кіл” [Matrix-topological description of electromagnetic circuits], *Electrical and Computer Systems*, Technica, Kiev, Ukraine, Vol. 11 (87), pp. 66-73. (In Ukrainian)

10. Krasnov, V. V. and Siddelev, N.I. (1984), “Topologicheskii-izomorfnoe modelirovanie jelektromagnitnyh cepej” [Topologically-isomorphic modeling of electromagnetic circuits], *Electrical equipment of ships*. Nikolaevskij korablestroitel'nyj institute Publ., Nikolaev, Ukraine, pp. 3-9. (In Russian).

11. Mathanov, P. N. (1986), “Osnovy analiza jelektricheskikh cepej. Nelinejnye cepi: Uchebnik dlja studentov jelektrotehn. spec. vuzov. - 2-e izd., pererab. i dop.” [Bases of the analysis of electrical circuits. Nonlinear circuit: the textbook for students of electrotechnical specialties. - 2nd ed., rev. and add.], Vysshaja shkola Publ., Moscow, USSR, 252 p. (In Russian).

12. Mustafa, G. M. and Fedotov, Y.B. (1983), “Programma dlja rascheta cepej s ideal'nymi transformatorami” [The program for the calculation of circuits with ideal transformers], *Jelektrotehnicheskaja promyshlennost'. Preobrazovatel'naja tehnika*, Vol. 5, pp. 3-5. (In Russian).

13. Ortega, J. and Reynolds, V. (1975), “Iteracionnye metody reshenija nelinejnyh sistem uravnenij so mnogimi neizvestnymi: Per. s angl.” [Iterative methods for solving nonlinear systems of equations with many unknowns: Trans. from English], Mir Publ., Moscow, USSR, 560 p. (In Russian).

14. Riabenkey, V. M., Dragan S. V. and Solobuto, L.V. (2008), “Osnovy modeljuvannja system i procesiv v elektrotehnici (Vykorystannja paketa prykladnyh program MATLAB/Simulink)” [Fundamentals of modeling of systems and processes in electrical engineering (Use the package of applied programs of MATLAB/Simulink). Study guide], *Novyj svit – 2000 Pub.* Lvov, Ukraine, 385 p. (In Ukrainian).

15. Siddelev, N. I. (1982), “Ob upravlenii iteracionnymi vychislenijami pri modelirovanii fizicheskikh processov” [On the control of iterative calculations for modeling physical processes], Nikolaevskij korablestroitel'nyj institute Publ., Nikolaev, Ukraine, Vol. 190, pp. 36-39. (In Russian).

16. Alotto, P.a., Freschi, F.b., Repetto, M.B. and others. (2013), “Topological equations, Lecture Notes in Electrical Engineering”,

230, pp.11-20, doi: 10.1007/978-3-642-36101-2-2. (In English).

17. Deskur, J. (1999), “Models of magnetic circuits and their equivalent electrical diagrams”, *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 18 Iss: 4, pp.600 – 610. (In English).

18. Kirawanich, P.a., Gleason, D.A., Yakura, S.J.b. and others. (2006), “Electromagnetic Topology Quasisolutions for Aperture Interactions Using Transmission Line Matrix”, *Journal of Applied Physics*, 99 (4), art. no. 044910, doi: 10.1063/1.2173690. (In English).

19. Ortner, M. G., Christian, M., and Klaus, K. (2010), Solver for a Magnetic Equivalent Circuit and Modeling the Inrush Current of a 3-Phase Transformer”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 40. (In English).

20. Parmantier, J. P. (2007), “EM topology: From theory to application”, *Ultra-wideband, Short-pulse Electromagnetics*, 7, pp.3-12. (In English).

21. Tesche, F. M., Ianoz, M.V. and Karlsson, T. (1997), “EMC Analysis Methods and Computational Models”, *John Wiley & Sons Inc*, New York, 656 p. (In English).



Сиделев Николай Иванович, к.т.н., доцент кафедры приборостроения Черноморского государственного университета имени Петра Могилы.  
54003, Николаев, ул. Володарского, 2/83.

Тел.: +380-50-3947263

E-mail:

[int2100rada@ukr.net](mailto:int2100rada@ukr.net)