

УПРАВЛЯЕМАЯ ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

Н. И. Сиделев

Черноморский национальный университет имени Петра Могилы

Аннотация. В статье разработана адаптивная цифровая модель электромагнитных цепей. Особенностью данной модели является то, что она по своему виду совмещает в себе несколько методов интегрирования системы дифференциальных уравнений. Комбинируя их, можно достичь максимальной корректности вычислений по энергетическим составляющим в процессе моделирования.

Ключевые слова: электрическая цепь, магнитная цепь, статические электромагнитные устройства, матрично-топологическое описание, топологические матрицы, матрицы инцидентностей, матрица витковых зацеплений, топологически-изоморфная модель.

Введение

При исследовании энергоемких электротехнических устройств (вторичных источников питания, статических преобразователей, генераторов импульсных токов и т.д.) будет уместным использовать матричные методы, позволяющие выделять накопление и расход энергии на отдельных различного рода элементах электромагнитных цепей (ЭМЦ). Это позволит упростить разработку экономичных и эффективных электротехнических устройств.

В работах [8, 9] предложено ЭМЦ представлять топологически-изоморфной матрицей следующего вида:

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

где блоки матрицы – это матрицы инцидентностей:

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.

В работе [18] предложено использовать математическое описание ЭМЦ в форме Коши, которое разрешено относительно производных магнитных потоков Φ и электрических потенциалов на конденсаторах V_c :

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

$$V_c' = [A_c C A_c^t]^{-1} A_{cr} Y_r (W^t \Phi' - A_{cr}^t V_c - E), \quad (2)$$

где $F = \Gamma_m R_m \Gamma_m^t \Phi = \Gamma_m L H$;

Γ_m – матрица инцидентностей магнитной части схемы;

R_m – диагональная матрица магнитных сопротивлений;

L – матрица длин магнитопроводов;

H – вектор-столбец магнитной напряженности в стержнях;

W – матрица витковых зацеплений [8];

C – матрица емкостей электрической части схемы;

Y – матрица проводимостей электрической части схемы;

E – вектор-столбец электродвижущих сил (ЭДС).

Как показывают результаты моделирования, математическая модель ЭМЦ (1)-(2) хорошо себя повела при расчете трансформаторной схемы [18]. Однако в общем случае могут возникать проблемы, связанные с жесткостью уравнений и, в связи с этим, с контролем вычислительного процесса. Это крайне важно, если целью исследования ЭМЦ является энергетика. Одним из путей решения данного вопроса может быть разработка метрологического аппарата.

Данная статья является продолжением статей, представленных в 11 и 20 выпусках научно-технического журнала «Электротехнические и компьютерные системы» [8,18].

1. Проблема жесткости

В общем случае составляющие параметров Y, C, R_m электротехнических устройств могут сильно отличаться друг от друга. Это приводит к жесткости систем дифференциальных уравнений. Понятие жестких уравнений впервые введено в 1952 году К. Куртисом и Д. Хиршфельдером [1]. Особенностью таких систем является необ-

ходимость уменьшения шага интегрирования при использовании классических методов Эйлера, Рунге-Кутты, Адамса и др.:

$$h < \tau_{n.c.}, \quad (3)$$

где h - шаг интегрирования;

$\tau_{n.c.} < b - a$ - пограничный слой [15];

$[a, b]$ - отрезок наблюдения (может соответствовать периоду основной гармоники исследуемого процесса).

Выполнение условия (3) позволяет отобразить высокочастотные составляющие, являющиеся следствием протекания физических процессов в цепях заряда с малыми постоянными времени и в высокочастотных колебательных контурах. Однако значение

$$N = \frac{T}{\tau_{n.c.}},$$

где T - период основной гармонической составляющей исследуемого процесса, может оказаться таким, что использование стандартных методов будет непригодным из-за большой длительности расчета. В данном случае полезными оказываются обратные методы численного интегрирования: обратный метод Эйлера [20], метод трапеций, формулы дифференцирования назад (ФДН) [3] и др. Эти методы хороши тем, что в зависимости от шага численного интегрирования получаем соответствующую "детализацию" физического процесса, при этом устойчивость вычислительного процесса не нарушается.

Известно, что погрешности явного и неявного методов близки по модулю и пропорциональны h^2 , но различны по знаку [19]. Поэтому, сочетая эти методы, можно получить хорошее приближение. Это достигается расчетом производных векторов состояния относительно различных точек внутри интервала интегрирования [7].

Если на шаге интегрирования выполнить линейную аппроксимацию, то приращения $\Delta\Phi$ и ΔV_ε можно определить, разрешая систему алгебраических уравнений. Покажем это на примере. Пусть

$$X = \begin{bmatrix} \Phi \\ V_\varepsilon \end{bmatrix},$$

тогда

$$AX' = BX + CE, \quad (4)$$

где A, B, C - квадратные матрицы;

X, E - вектор-столбцы.

Запишем систему (4) в следующем виде:

$$X' = A^{-1}(BX + CE). \quad (5)$$

Приращение на шаге интегрирования относительно различных точек внутри интервала

$$\Delta X = h \left[A^{-1} B \left(X + \frac{\Delta X}{z} \right) + A^{-1} C E \right]. \quad (6)$$

Разрешаем систему (6) относительно ΔX :

$$\Delta X = \left(I - \frac{h A^{-1} B}{z} \right) h A^{-1} (BX + CE). \quad (7)$$

Представим производные (1) – (2) внутри интервала:

$$\Phi' = F_\Phi \left(\Phi + \frac{\Delta\Phi}{z}, V_\varepsilon + \frac{\Delta V_\varepsilon}{z}, E + \frac{\Delta E}{z} \right) \quad (8)$$

$$V_\varepsilon' = F_V \left(\Phi + \frac{\Delta\Phi}{z}, V_\varepsilon + \frac{\Delta V_\varepsilon}{z}, E + \frac{\Delta E}{z} \right) \quad (9)$$

Если выполнить операции аналогично (5) – (7) на системой (8) – (9), можно получить:

$$\begin{bmatrix} h^{-1} W Y_\rho W^t + z^{-1} \Gamma_m R_m \Gamma_m^t & -z^{-1} W Y_\rho A_{\varepsilon\rho}^t \\ -h^{-1} A_{\varepsilon\rho} Y_\rho W^t & h^{-1} A_\varepsilon C A_\varepsilon^t + z^{-1} A_{\varepsilon\rho} Y_\rho A_{\varepsilon\rho}^t \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} \Delta\Phi \\ \Delta V_\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W Y_\rho (A_{\varepsilon\rho}^t V_\varepsilon + E) - F(\Phi) \\ -A_{\varepsilon\rho} Y_\rho (A_{\varepsilon\rho}^t V_\varepsilon + E) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Относительно $\Delta\Phi$ и ΔV_ε система (10) может быть решена любым численным методом. Варьируя значением z , можем менять методы численного интегрирования, например:

- а) при $z = \infty$ - явный метод Эйлера;
- б) при $z = 1$ - обратный метод Эйлера;
- в) при $z = 2$ - метод трапеций и др.

Параметр z может принимать также любое нецелочисленное значение.

Квадратная матрица в системе (10) может быть плохо обусловленной в одном случае, когда в схеме имеются емкости с "висящими" узлами. Это может встретиться при исследовании цепей по частям. В этом случае рекомендуется зашунтировать "висящие" емкости резисторами одним из приведенных способов (см.рис.1). Вариант (рис.1,б) является предпочтительным, так как требует меньшее число дополнительных элементов.

Итак, разработана управляемая цифровая модель ЭМЦ (10), удовлетворяющая требованиям устойчивости в условиях жесткости систем дифференциальных уравнений. Очевидно, что потребуется определить критерий оптимизации численного решения, позволяющий управлять вычислительным процессом посредством z .

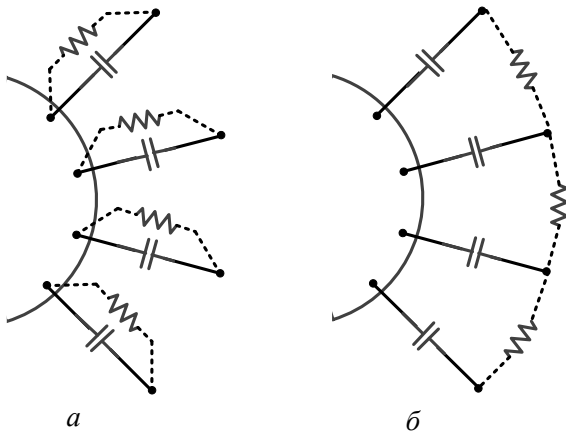


Рис.1. Способы улучшения обусловленности матрицы (10) шунтированием резисторами "висящих" емкостей

2. Источники накопления ошибок при расчете энергетике на цифровых вычислительных машинах (ЦВМ)

В процессе анализа энергетике преобразовательных устройств конечные результаты в той или иной мере подвержены влиянию ошибок. Во-первых, это ошибки, связанные с численным моделированием физических процессов. Во-вторых - ошибки, являющиеся следствием неточности численного метрологического аппарата.

Оценка погрешностей как одна из основных проблем численного анализа выполнена в работе [16]. Погрешности численных моделей можно разделить на четыре группы:

- а) неустраняемые погрешности решения, связанные с неточностью исходных данных [5];
- б) устранимые погрешности, обусловленные неточностью начальных условий;
- в) методические погрешности формул численного интегрирования [21];
- г) вычислительные погрешности, связанные с особенностями ЭВМ.

Среди них ("а", "б" и "г") не являются объектами численной оптимизации, хотя в ряде случаев можно избежать нежелательных последствий алгоритмизацией некоторых вычислительных процедур. Они полностью определяются структурой ЭВМ и классом точности измерительных устройств. Ошибки ("а", "б" и "г") в общем случае могут повлиять на устойчивость вычислительного процесса.

Методические ошибки формул численного интегрирования присутствуют всегда и их количественная оценка определяется собственно методом. Можно показать, как при моделировании идеального колебательного контура методом Эйлера в классической форме постоянно накапли-

вается ошибка в определении суммарной энергии. Действительно, алгоритм вычисления имеет вид [9]:

$$\Delta U = \frac{-hI_0}{C};$$

$$\Delta I = \frac{hU_0}{L};$$

$$U = U_0 + \Delta U;$$

$$I = I_0 + \Delta I,$$

откуда следует, что энергия, запасенная в контуре в начале шага интегрирования:

$$W_0 = \frac{U_0^2 C + I_0^2 L}{2},$$

а в конце шага приобретает значение:

$$W_0 = \frac{(U_0 + \Delta U)^2 C + (I_0 + \Delta I)^2 L}{2},$$

что дает приращение на одном шаге интегрирования:

$$\Delta W = W - W_0 = \frac{W_0 h^2}{LC}.$$

Таким образом, "накачка" энергии в контур происходит в геометрической прогрессии согласно уравнению:

$$W = W_0 \left(1 + \frac{h^2}{LC} \right).$$

По теореме Далквиста [21] наиболее точным и устойчивым методом порядка 2 является метод трапеций. Этот метод также позволяет свести к минимуму влияние ошибок "а", "б" и "г".

Любой метрологический аппарат (электротехнические измерители, вычислительные средства) имеет в своих показаниях погрешности, связанные с принципом действия измерительного органа. При численном исследовании устройств снятие качественных показаний производится численным способом. Полученные результаты могут использоваться также в дальнейших расчетах, что в свою очередь может внести дополнительную неустойчивость в вычислительный процесс. Например, при вычислении энергии, затраченной в течение исследуемого периода времени, производится приращением энергии, рассчитанным на каждом шаге. Если погрешность будет постоянно накапливаться и не устраняться каким-либо способом, то результаты могут быть неверными.

3. Разработка метрологических процедур для расчета энергетике в математических моделях ЭМЦ

Уже неоднократно пересматривались устоявшиеся взгляды на некоторые энергетические характеристики. Например, подвергались крити-

ке определение полной мощности для существенно нелинейной цепи [17]. В этом разделе не предлагаются теоретические разработки по части каких-то новых энергетических определений, а ставится цель создать математическое обеспечение, позволяющее без дополнительно вносимых ошибок оценивать распределение энергии в элементах и узлах статических электромагнитных устройств, т.е. свести к нулю ошибки численного метрологического аппарата.

Единственной основой для установления взаимосвязи энергетических характеристик принят закон сохранения энергии.

3.1. Основные предпосылки к развитию численных метрологических процедур в электроэнергетике

При исследовании мощных электроэнергетических устройств численными методами часто возникает необходимость в получении некоторых значений, характеризующих эффективность и энергоёмкость устройств и отдельных его узлов. Единственной реальной возможностью определять их на ранней стадии проектирования является использование ЭВМ. При этом применяется классическое выражение для расчета энергии:

$$W = \int_0^T P(t) dt,$$

где $P(t)$ - функция мощности;

T - исследуемый интервал времени.

Переходя к конечным разностям, получаем выражение:

$$\Delta W_{n+1} = P_n(t) \Delta t, \quad (11)$$

дающее большие погрешности, свойственные методу Эйлера. Эта неточность вызвана нелинейностью функций тока и напряжения, входящих в значение мощности.

Однако, получая явно обнаруживающие себя неверные результаты, все усилия обычно направляют на усовершенствование методов численного анализа и лишь изредка прибегают к модернизации метрологической процедуры (11). При этом всегда остаются составляющие методических ошибок численного моделирования и метрологического контроля.

Так, например, явно грубыми являются матричные соотношения, определяющие распределение энергии в элементах электромагнитных устройств:

$$W_R = W_L + I^t R I \Delta t;$$

$$W_L = W_L + H^t \Delta \Phi;$$

$$W_P = W_P + E^t I \Delta t,$$

где W_R - энергия, рассеиваемая на активных сопротивлениях; W_L - энергия, накапливаемая в магнитном поле; W_P - энергия, потребляемая из сети.

Исключением является выражение, не вносящее дополнительных погрешностей, так как использует конечное значение переменной:

$$W_C = \frac{1}{2} V_\varepsilon^t C V_\varepsilon, \quad (12)$$

где W_C - энергия, накапливаемая в электрическом поле.

3.2. Аналитический расчет рассеиваемой энергии на активных сопротивлениях

Как уже отмечалось, точность расчета энергетики должна превосходить точность численного метода интегрирования переменных. Только тогда эта процедура может быть использована в качестве метрологической. Аналитическое решение дает точное значение рассеиваемой энергии на шаге интегрирования при этом на интервале.

$$\Delta W_R = \int_0^h i^2(t) R dt, \quad (13)$$

при этом на интервале $[i_k, i_{k+1}]$

$$i(t) = i_k + \frac{\Delta i_{k+1}}{h} t. \quad (14)$$

Значение интеграла (13) определяется достаточно легко:

$$\begin{aligned} \Delta W_R &= R \int_0^h \left(i_k^2 + \frac{2 \Delta i_{k+1} i_k}{h} t + \frac{\Delta i_{k+1}^2 t^2}{h^2} \right) dt = \\ &= R \left(i_k^2 + \Delta i_{k+1} i_k + \frac{\Delta i_{k+1}^2}{3} \right) h = R \left(i_{k+1} i_k + \frac{\Delta i_{k+1}^2}{3} \right) h. \end{aligned}$$

Представим вычисление рассеиваемой энергии на активных проводниках в матричной форме:

$$W_R^{k+1} = W_R^k + h \left[I_k^t R I_{k+1} + \frac{1}{3} \Delta I_{k+1}^t R \Delta I_{k+1} \right]. \quad (15)$$

3.3. Аналитический расчет потребляемой энергии из сети

Способом, описанным в п.4.2, можно получить выражение для расчетов приращения энергии, потребляемой из сети. По аналогии с (14) считаем, что ЭДС сети на шаге интегрирования изменяется по закону:

$$e(t) = e_k + \frac{\Delta e_{k+1}}{h} t.$$

Тогда решением интеграла

$$\Delta W_P = \int_0^h \left(e_k + \frac{\Delta e_{k+1}}{h} t \right) \left(i_k + \frac{\Delta i_{k+1}}{h} t \right) dt$$

есть выражение

$$\Delta W_P = h \left[e_k i_k + \frac{\Delta e_{k+1} i_k + \Delta i_{k+1} e_k}{2} + \frac{\Delta e_{k+1} \Delta i_{k+1}}{3} \right]. \quad (16)$$

Уравнение (16) описывает передачу энергии на шаге интегрирования в одной ветви схемы. Суммарная передаваемая энергия всеми источниками электрической энергии в матричной форме:

$$W_P^{k+1} = W_P^k + h \left(E_k^t I_k + \frac{1}{2} \Delta E_{k+1}^t I_k + \frac{1}{2} E_k^t \Delta I_{k+1} + \frac{1}{3} \Delta E_{k+1}^t \Delta I_{k+1} \right). \quad (17)$$

3.4. Расчет энергии, накапливаемой в магнитных системах

Магнитные характеристики магнитопроводов можно представить в аналитической форме [58]:

$$H = kB + c(e^{ab} - e^{-ab}) + H_c, \quad (18)$$

где $H_c^{n+1} = H_c^n + (1 - e^{-q|\Delta B|})(H_{co} \text{sign} \Delta B - H_c^n)$ -

составляющая, учитывающая гистерезис по принципу «сухого трения» [10, 12, 13]; H_{co} - остаточная коэрцитивная сила; ΔB - приращение магнитной индукции на $n+1$ шаге; a, b, c, k, q - параметры аппроксимации.

Чтобы получить значение накопленной энергии магнитного поля в системе на начальном участке магнитной характеристики, достаточно вычислить интеграл от (18) и умножить на объем ферромагнитной среды V :

$$W_n = \left[\frac{k}{2} B^2 + \frac{c}{a} (e^{ab} + e^{-ab} - 2) + H_c B \right] V. \quad (19)$$

Однако в насыщенной зоне характеристики выражение (19) существенно усложняется. Как

показали исследования, при численном интегрировании петли гистерезиса метод трапеций дает погрешность не более 10^{-5} :

$$W_L^{k+1} = W_L^k + \left[\frac{F^{k+1} + F^k}{2} \right] \Delta \Phi^{k+1}, \quad (20)$$

где F - намагничивающая сила; $\Delta \Phi$ - приращение магнитного потока; W_L - энергия магнитного поля.

При реализации на ЭВМ (20) существенно сокращаются вычислительные затраты, если учесть, что F^{k+1} , F^k и $\Delta \Phi$ получаются в результате "других" численных процедур (10). Энергия в воздушном зазоре вычисляется отдельно:

$$W_{L0} = \frac{1}{2} F_0^t \Phi_0,$$

где F_0 , Φ_0 - намагничивающая сила и магнитный поток в воздушном зазоре.

3.5. Критерий энергетического баланса для управления вычислительным процессом

Как уже отмечалось, единственной основой для установления взаимосвязи энергетических характеристик принят закон сохранения энергии:

$$W_L + W_C + W_R - W_P = 0. \quad (21)$$

Вследствие неизбежного влияния погрешностей на конечный результат, это условие выполнено не будет. Ненулевой результат по (21) назовем невязкой энергетического баланса, что является результатом накопившейся суммарной ошибкой вычислительного процесса:

$$W_L + W_C + W_R - W_P = \varepsilon = \varepsilon_{ч.м.} + \varepsilon_{м.а.} \quad (22)$$

Ошибка метрологического аппарата $\varepsilon_{м.а.}$ для принятого закона изменения переменных внутри интервала интегрирования, используя приведенный математический аппарат, сведена к нулю. Таким образом, невязка энергетического баланса может быть критерием точности численного моделирования. Это дает возможность использовать его для управления вычислительным процессом.

В зависимости от знака $\varepsilon_{ч.м.}$ посредством параметра z (см.п.4.1) можем менять методы численного интегрирования, дающие разные по знаку значения ошибок. Этот параметр должен изменяться из условий устойчивости [19] от I до 2.

Адаптивний алгоритм численного моделирования представлен на рис.2. В блок-схеме алгоритма предусмотрен шаг изменения z , который определяет степень реакции цифровой модели ЭМЦ на отклонение ε от нуля. Для управления вычислительным процессом посредством z может быть выбран любой другой эффективный алгоритм и быть предметом оптимизации [2, 4, 6, 11, 14].

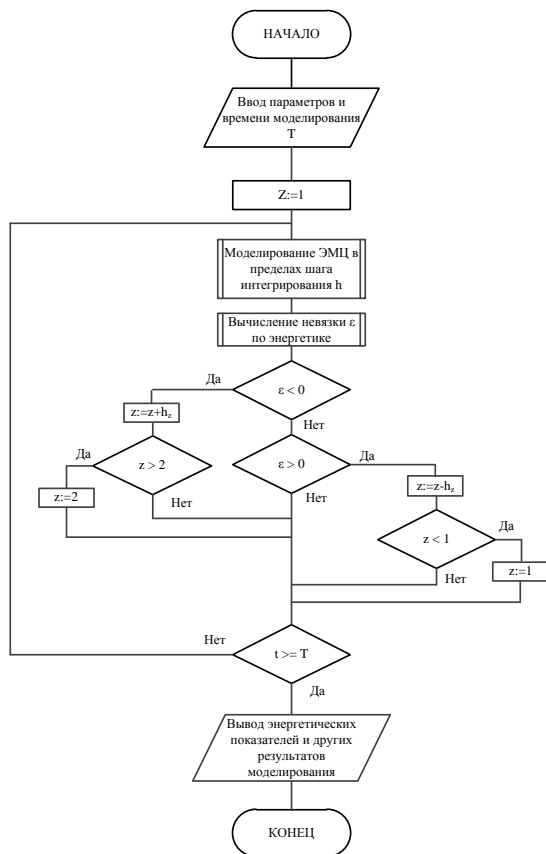


Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления вычислительным процессом

Выводы

Разработана устойчивая математическая модель электромагнитных цепей в матричном виде (10), удобная для реализации на цифровых вычислительных машинах. Модель составлена относительно приращений магнитных потоков и потенциалов на емкостях.

Разработан адаптивный алгоритм для исследования электромагнитных цепей с нелинейными характеристиками. Обратная связь обеспечивается посредством параметра z .

Система (10) является адаптивной к методам численного интегрирования. В зависимости от значения параметра z можно менять методы интегрирования.

Проведен анализ причин возникновения ошибки при расчете энергетики. Эта ошибка состоит из двух составляющих: ошибки численного моделирования и ошибки численного метрологического аппарата.

Разработаны метрологические процедуры для исследования энергетики электромагнитных цепей по результатам численного моделирования. Получены аналитические формулы расчета энергии, рассеянной на активных сопротивлениях и потребленной из сети.

Разработан алгоритм управления вычислительным процессом по критерию энергетического баланса.

Разработанное математическое обеспечение, хорошо алгоритмизуется на цифровых вычислительных машинах и может быть использовано при создании специализированных программных средств.

Список использованной литературы

1. Curtiss, C. F., Hirschfelder, J. O. "Integration of stiff equations" [Text]. – Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1952. p.38.
2. Бейко, И. В. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации [Текст] / И. В. Бейко, В. Н. Бублик, П. Н. Зинько. – Киев: Вища школа. Головное издательство, 1983. – 512 с.
3. Брайтон, Р. К. Новый эффективный алгоритм решения алгебраических систем дифференциальных уравнений, основанный на использовании формул численного дифференцирования в неявном виде с разностями назад [Текст] / Р. К. Брайтон, Ф. Г. Густавсон, Г. Д. Хэчел // В сб.: Автоматизация в проектировании. – М.: Мир, 1972. С. 136-148.
4. Васильев, Ф. П. Методы решения экстремальных задач: Учебное пособие [Текст] / Ф. П. Васильев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 400с.
5. Воеводин, В. В. Вычислительные основы линейной алгебры [Текст] / В. В. Воеводин. – М.: Наука, 1977. – 303 с.
6. Гилл, Ф. Практическая оптимизация: Пер. с англ. [Текст] / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
7. Ильин, В. Н. Основы автоматизации схемотехнического проектирования [Текст] / В. Н. Ильин. – М.: Энергия, 1979. – 392 с.
8. Краснов, В. В. Матрично-топологичний опис електромагнітних кіл [Текст] / В. В. Краснов, М. І. Сіделєв // Електротехнічні та комп'ютерні системи, вип. 11 (87). – К.: «Техніка», 2013. – С. 66-73.
9. 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.

10. Красносельский, М. А. Системы с гистерезисом / М. А. Красносельский, А. В. Покровский. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 272с.

11. Марчук, Г. И. Методы вычислительной математики [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 536 с.

12. Писаренко, Г. С. Обобщенная нелинейная модель учета рассеяния энергии при колебаниях / Г.С. Писаренко. – Киев: Наукова думка, 1985. – 240 с.

13. Писаренко, Г.С. Сопоставление результатов расчета колебаний систем с одной степенью свободы с учетом рассеяния энергии в материале, исходя из различных уравнений, описывающих контур петли гистерезиса / Г.С. Писаренко, О. Е. Богинич. – Киев: Наукова думка, 1974. – С. 12-24.

14. Полак, Э. Численные методы оптимизации. Единый подход: Пер. с англ. [Текст] / Э. Полак // Под ред. И. А. Вателя. – М.: Мир, 1974. – 376 с.

15. Ракитский, Ю.В. Численные методы решения жестких систем [Текст] / Ю. В. Ракитский, С. М. Устинов, И. Г. Черноруцкий. – М.: Наука, 1979. – 208 с.

16. Ряполов, С. И. Обобщенный метод численного решения задач Коши / С. И. Ряполов // Под ред. проф. К. Н. Барина. – Министерство обороны СССР, 1975. – 125 с.

17. Савиновский, Ю. А. Некоторые противоречия теории мощности [Текст] / Ю. А. Савиновский, А. В. Стратонов // Изв. вузов: Энергетика, 1984, № 10. – С. 58-60.

18. Сиделев, Н. И. Матрично-топологическое описание электромагнитных цепей в форме Коши [Текст] / Н. И. Сиделев // Электротехнические и компьютерные системы, вып. 20 (96). – «Наука и техника», 2015. – С. 63-73.

19. Справочник по расчетам на микрокалькуляторах / Под ред. В. П. Дьяконова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 224 с.

20. Форсайт, Дж. Машинные методы математических вычислений: Пер. с англ. [Текст] / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулдер. – М.: Мир, 1980. – 280 с.

21. Чуа, Л. О. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы [Текст] / Л. О. Чуа, Пен-Мин Лин // Пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.

References

1. Curtiss, C. F., Hirschfelder, J. O. (1952) "Integration of stiff equations". – Proc. Nat. Acad. Sci. USA, p.38.

2. Beyko, I. V., Bublik, V. N., Zinko, P. N. (1983) "Methods and algorithms for solving optimization problems" [Metody i algoritmy reshenija zadach optimizacii], Vishcha school. The head publishing house, Ukraine, Kiev, p. 512.

3. Brajton, R. K., Gustavson, F. G., Hjechtel, G. D. (1972) "A new effective algorithm for solving algebraic systems of differential equations, based on the use of numerical differentiation formulas in implicit form with differences back" [Novyj jeffektivnyj algoritm reshenija algebraicheskikh sistem differencial'nyh uravnenij, osnovannyj na ispol'zovanii formul chislennogo differencirovanija v nejavnom vide s raznostjami nazad], Automation in the design, Mir, USSR, Moscow, pp. 136-148.

4. Vasiliev, F. P. (1981) "Methods of solving extremal problems: Textbook" [Metody reshenija jekstremal'nyh zadach: Uchebnoe posobie], Science. The main edition of physics and mathematics, USSR, Moscow, p. 400.

5. Voevodin, V. V., (1977) "Computational foundations of linear algebra" [Vychislitel'nye osnovy linejnoy algebry], Science, USSR, Moscow, p. 303.

6. Gill, F., Murray, W., Wright, M. (1985) "Practical optimization: Trans. with the English" [Prakticheskaja optimizacija: Per. s angl.], Mir, USSR, Moscow, p. 509.

7. Ilyin, V. N. (1979) "Fundamentals of automation of circuit design" [Osnovy avtomatizacii shemotehnicheskogo proektirovanija], Energy, USSR, Moscow, p. 392.

8. Krasnov, V. V., Siddelev, N. I. (2013), "Matrix-topological description of electromagnetic circuits" [Matrychno-topologichnyj opys elektromagnitnyh kil], Electrical and Computer Systems, Technica, Kiev, Ukraine, Vol. 11 (87), pp. 66-73.

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

10. Krasnoselsky, M. A., Pokrovsky, A. V. (1983) "Systems with hysteresis" [Sistemy s gisterezisom], Science. The main edition of physics and mathematics, USSR, Moscow, p. 272.

11. Marchuk, G. I. (1980) "Methods of Computational Mathematics" [Metody vychislitel'noj matematiki], Science. The main edition of physics and mathematics, USSR, Moscow, p. 536.

12. Pisarenko, G. S. (1985) Generalized nonlinear model of energy dissipation in vibrations [Obobshchennaja nelinejnaja model' ucheta rassejanija jenerгии pri kolebanijah], Naukova Dumka, Ukraine, Kiev, p. 240.
13. Pisarenko, G. S., Boginich, O. E. (1974) "Comparison of the results of calculating the oscillations of systems with one degree of freedom, taking into account the energy dissipation in the material, starting from various equations describing the contour of the hysteresis loop" [Sopostavlenie rezul'tatov rascheta kolebanij sistem s odnoj stepen'ju svobody s uchetom rassejanija jenerгии v materiale, ishodka iz razlichnyh uravnenij, opisyvajushhih kontur petli gisterezisa], Naukova Dumka, Ukraine, Kiev, pp. 12-24.
14. Polak, E. (1974) "Numerical optimization methods. A unified approach: Trans. with the English" [Chislennye metody optimizacii. Edinyj podhod: Per. s angl.], Mir, USSR, Moscow, p. 376.
15. Rakitskij, J. V., Ustinov, S. M., Chernoruckij, I. G. (1979), "Numerical methods for solving rigid systems" [Chislennye metody reshenija zhestkih sistem], Science, USSR, Moscow, p. 208.
16. Ryapolov, S. I. (1975) "A generalized method for the numerical solution of Cauchy problems" [Obobshchennyj metod chislennogo reshenija zadach Koshi], Ministry of Defense of the USSR, p. 125.
17. Savinovsky, Yu., A., Stratonov, A. V. (1984) "Some contradictions in the theory of power" [Nekotorye protivorechija teorii moshhnosti], Izv. Universities: Energy, № 10, pp. 58-60.
18. Siddelev, N. I. (2015), "Matrix-topological description of electromagnetic circuits in the form Cauchy" [Matrichno-topologicheskoe opisanie jelektromagnitnyh cepej v forme Koshi], Electrical and Computer Systems, Science and Technical, Ukraine, Vol. 20 (96), pp. 63-73.
19. Djakonov, V. P. (1985) "Handbook of calculations on micro calculators" [Spravochnik po raschetam na mikrokal'kuljatorah], Science, USSR, Moscow, p. 224.
20. Forsajt, Dzh., Malkolm, M., Mouler, K. (1980) "Computer methods of mathematical calculations: Trans. from English" [Mashinnye metody matematicheskikh vychislenij: Per. s angl.], Mir, USSR, Moscow, p. 280.
21. Chua, L.O., Pen-Min, Lin (1980) "Machine Analysis of Electronic Circuits: Algorithms and Computational Methods" [Mashinnyj analiz jelektronnyh shem: Algoritmy i vychislitel'nye metody], Energy, USSR, Moscow, p. 640.

MANAGE DIGITAL MODEL BASED ON MATRIX-TOPOLOGICAL DESCRIPTION ELECTROMAGNETIC CIRCUITS

N. I. Siddelev

Black Sea National University of a name of Peter Mogila

Abstract. *In the article the digital 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. An analysis is made of the causes of the error in the calculation of energy. This error consists of two components: numerical simulation errors and errors in the numerical metrology apparatus. Metrological procedures is made for the investigation of the energy of electromagnetic circuits. A stable mathematical model of electromagnetic circuits in a matrix form is developed, convenient for implementation on digital computers. The model is composed relative to the increments of magnetic fluxes and potentials on the capacitors. Thus it is convenient to follow the energy processes in the reactive power-consuming elements of the circuit. An adaptive algorithm for controlling a computational process using the energy balance criterion for studying electromagnetic circuits with nonlinear characteristics is developed. Feedback is provided through a special parameter. The peculiarity of this model is that it in its kind combines several methods of integrating a system of differential equations. By combining them, it is possible to achieve maximum correctness of calculations for the energy components in the simulation of the electromagnetic circuit.*

Keywords: *Electric circuit, magnetic circuit, static electromagnetic devices, a matrix-topological description, topological matrices, incidence matrices, a matrix of helical links, a topologically isomorphic model.*

КЕРОВАНА ЦИФРОВА МОДЕЛЬ НА ОСНОВІ МАТРИЧНО-ТОПОЛОГІЧНОГО ОПИСУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КІЛ

М. І. Сідєєв

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Анотація. У статті розроблена адаптивна цифрова модель електромагнітних кіл. Особливістю даної моделі є те, що вона за своїм виглядом поєднує в собі кілька методів інтегрування системи диференціальних рівнянь. Комбінуючи їх, можна досягти максимальної коректності обчислень з енергетичних складових в процесі моделювання.

Ключові слова: електричне коло, магнітне коло, статичні електромагнітні пристрої, матрично-топологічний опис, топологічні матриці, матриці інцидентів, матриця виткових зачеплень, топологічно-ізоморфна модель.

Получено 16.06.2017



Сидєєв Николай Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и компьютерно-интегрированных технологий Черноморского национального университета имени Петра Могила, ул. 68 Десантников, 10, Николаев, Украина. E-mail: int2100rada@ukr.net, тел. +380-50-3947263

Nickolay Siddelev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor of faculty of automatics and the computer-integrated technologies, Black Sea National University of a name of Peter Mogila, 68 Desantnikov, 10, Nikolaev, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-4968-1607