

УДК 621.31

ББК 31.25

А.И. ОРЛОВ

АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МАТРИЦ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Ключевые слова: модифицированный метод узловых потенциалов, уравнения электрической цепи, моделирование, задача Коши, вырожденная матрица.

В работе предложен алгоритм преобразования матриц состояния электрической цепи, полученных по правилам модифицированного метода узловых потенциалов. Алгоритм направлен на приведение системы дифференциальных уравнений цепи к форме задачи Коши с целью последующего решения. Применение модифицированного метода узловых потенциалов к электрической цепи с энергоемкими элементами приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, запись которой в матричной форме содержит вырожденную матрицу перед вектором производных при наличии в цепи незаземленных конденсаторов. По этой причине непосредственное приведение данной системы уравнений к форме задачи Коши невозможно. Идея решения таких систем состоит в переходе от уравнений с потенциалами к уравнениям с напряжениями и последующем разделении системы уравнений на две части: содержащие производные и без них. Важным этапом перехода к уравнениям с напряжениями является устранение линейно зависимых строк вырожденной матрицы. Алгоритм такого преобразования основан на анализе матрицы смежности, составленной для конденсаторов рассматриваемой электрической цепи, и является предметом данной работы. Алгоритм может применяться при топологически произвольном соединении неограниченного числа конденсаторов. С целью демонстрации в работе приведен пример использования алгоритма.

Повышение производительности вычислительной техники и связанное с этим расширение круга задач, решаемых посредством моделирования электрических цепей, определяет важное практическое значение вопросов совершенствования применяемых алгоритмов. Модифицированный метод узловых потенциалов, впервые представленный в работе [4], является одним из основных методов моделирования электрических цепей. Метод ориентирован на реализацию в форме программы для ЭВМ.

Актуальность развития метода и интерес к нему со стороны исследователей подтверждается большим количеством статей, посвященных совершенствованию различных аспектов его применения. Так, в работе [6] рассматриваются гибридные модели электрических и электронных устройств, основанные на модифицированном методе узловых потенциалов. В работе [7] рассматривается подход к моделированию электрических цепей, содержащих элементы, работающие в режиме силовых ключей с внутренним управлением, таких как выпрямительные диоды, и внешним управлением – транзисторов и др. При формировании матриц электрической цепи состояние каждого элемента, работающего в ключевом режиме, учитывается введением специальной управляющей переменной, принимающей значение 0 или 1 в зависимости от внутренних

или внешних условий. Метод широко используется российскими авторами. Так, в работе [2] рассматривается алгоритм моделирования диодно-резистивных схем на базе метода узловых потенциалов. В работе [1] метод применяется при моделировании импульсных регуляторов.

В настоящей работе рассматривается и применяется *метод* узловых потенциалов, применяются методы линейной алгебры, теории обыкновенных дифференциальных уравнений, теории графов.

В работе рассматриваются только 2-полюсные элементы. Это ограничение не носит принципиального характера, так как элементы с большим числом узлов, например индуктивно связанные контуры, могут быть представлены определенной совокупностью связанных между собой 2-полюсников.

Согласно модифицированному методу узловых потенциалов при анализе переходных процессов уравнение электрической цепи представляется в форме

$$\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\varphi} + \mathbf{C} \cdot \frac{d}{dt} \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{E}, \quad (1)$$

где \mathbf{G} и \mathbf{C} – матрицы состояния цепи размерностью $(N + M) \times (N + M)$; \mathbf{E} и $\boldsymbol{\varphi}$ – вектор-столбцы источников и неизвестных величин размерностью $(N + M)$; N – число узлов; M – число независимых источников ЭДС, индуктивностей, идеальных ключей и др.

Вектор-столбец неизвестных содержит 2 подвектора $\boldsymbol{\varphi} = [\boldsymbol{\varphi}_\varphi^T, \boldsymbol{\varphi}_i^T]^T$, где $\boldsymbol{\varphi}_\varphi$ – подвектор потенциалов узлов длиной N , $\boldsymbol{\varphi}_i$ – подвектор токов длиной M .

Метод удобен при компьютерном моделировании благодаря тому, что исходные данные, описывающие электрическую цепь, представляются в форме простого неупорядоченного списка элементов. В результате предварительного анализа элементов списка определяются размерности матриц \mathbf{G} , \mathbf{C} и векторов \mathbf{E} и $\boldsymbol{\varphi}$. Вклад каждого элемента учитывается путем добавления к предварительно созданным матрицам состояния цепи «штампов», специфичных для каждого типа элементов.

Определение вектора неизвестных $\boldsymbol{\varphi}$ для случаев постоянного или синусоидального тока (в комплексной форме) без учета изменения величин во времени $d\boldsymbol{\varphi}/dt = 0$, т.е. решение СЛАУ вида $\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{E}$, не вызывает вычислительных сложностей, так как матрица \mathbf{G} всегда невырождена. Однако при расчете переходных процессов непосредственное приведение системы уравнений (1) к форме задачи Коши невозможно по причине вырожденности матрицы \mathbf{C} . Причина этого заключается в наличии:

- а) нулевых строк и столбцов в матрице \mathbf{C} ;
- б) линейной зависимости пар строк и столбцов матрицы \mathbf{C} , соответствующих номерам узлов незаземленных конденсаторов.

Очевидный способ преодоления первого ограничения состоит в выделении ненулевых строк и столбцов матрицы \mathbf{C} в отдельную подматрицу \mathbf{C}_{ss} за счет группировки строк и столбцов матриц \mathbf{G} , \mathbf{C} и соответствующих элементов векторов \mathbf{E} и $\boldsymbol{\varphi}$, т.е. в приведении выражения (1) к виду

$$\begin{pmatrix} \mathbf{G}_{ss} & \mathbf{G}_{sa} \\ \mathbf{G}_{as} & \mathbf{G}_{aa} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varphi}_s \\ \boldsymbol{\varphi}_a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varphi}_s \\ \boldsymbol{\varphi}_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_s \\ \mathbf{E}_a \end{pmatrix}. \quad (2)$$

После этого система (1) распадается на две части. Сначала необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений и найти подвектор φ_a , зная известные начальные условия $\varphi_s(t_0)$, затем решить задачу Коши и найти подвектор $\varphi_s(t_1)$.

Однако подматрица C_{ss} получается невырожденной только при отсутствии в цепи незаземленных конденсаторов. Так, если выразить ток конденсатора i_C , включенного между узлами a и b электрической цепи, через потенциалы этих узлов

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d\varphi_a}{dt} - C \frac{d\varphi_b}{dt},$$

то для узлов a и b по 1 закону Кирхгофа соответственно:

$$\begin{pmatrix} C & -C \\ -C & C \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Sigma i_a \\ \Sigma i_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

где Σi_a и Σi_b – сумма токов узлов a и b без учета тока i_C . Матрица емкостей в данной системе уравнений является вырожденной по причине линейной зависимости ее строк (столбцов). В работе [5] приводится способ преодоления данного ограничения в 2 этапа:

1) устранение линейной зависимости строк матрицы емкостей путем замены одной из строк суммой обеих. Результат данного преобразования на примере системы (3) выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} C & -C \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Sigma i_a \\ \Sigma i_a + \Sigma i_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

2) переход от системы уравнений с потенциалами к системе уравнений с напряжениями. На примере системы уравнений (4) видно, что данная операция позволяет преобразовать систему к единственному дифференциальному уравнению вида $C \cdot du_C/dt + \Sigma i_a = 0$ с известным частным решением при наличии начальных условий и алгебраическому уравнению $\Sigma i_a + \Sigma i_b = 0$.

Для перехода к системе уравнений с напряжениями предварительно необходимо найти нормальное дерево графа цепи в форме матрицы смежности \mathbf{A}_{twings} размерностью $N \times N$. Простой способ поиска нормального дерева графа цепи описан в работе [3]. Способ основан на использовании алгоритма Краскала, в котором ребрам присвоены веса w в зависимости от типов элементов по правилу $w_E < w_C < w_R < w_L < w_J$. Тогда для подвектора неизвестных φ_φ размером N , содержащего только потенциалы узлов, напряжения определяются как $\mathbf{u}_{twings} = \mathbf{A}_{twings}^T \cdot \varphi_\varphi$, т.е. $\varphi_\varphi = (\mathbf{A}_{twings}^T)^{-1} \cdot \mathbf{u}_{twings}$. Поскольку элементы подвектора φ_i (токи) не преобразуются, то

$$\mathbf{G} \cdot \begin{bmatrix} (\mathbf{A}_{twings}^T)^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{u}_{twings} \\ \varphi_i \end{pmatrix} + \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} (\mathbf{A}_{twings}^T)^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_{twings} \\ \varphi_i \end{pmatrix} = \mathbf{E}, \quad (5.1)$$

или

$$\mathbf{G}' \cdot \varphi' + \mathbf{C}' \cdot \frac{d}{dt} \varphi' = \mathbf{E}. \quad (5.2)$$

где $\mathbf{0}$ – нулевая подматрица; $\mathbf{1}$ – единичная подматрица. Поскольку матрица смежности \mathbf{A}_{twings} всегда невырожденная, то матрица \mathbf{G}' также невырожденная.

Дальнейшее преобразование заключается в группировке строк и столбцов матриц \mathbf{G}' и \mathbf{C}' с целью выделения ненулевой подматрицы, т.е. приведения уравнения (5.2) к виду (2). Ненулевая подматрица \mathbf{C}_{ss} матрицы \mathbf{C}' после указанного преобразования становится невырожденной, что дает возможность найти вектор неизвестных. С помощью начальных условий $\varphi_s(t_0)$ из СЛАУ $\mathbf{G}_{as} \cdot \varphi_s(t_0) + \mathbf{G}_{aa} \cdot \varphi_a = \mathbf{E}_a$ выражается подвектор φ_a , затем в результате решения системы уравнений $\mathbf{G}_{ss} \cdot \varphi_s(t_1) + \mathbf{G}_{sa} \cdot \varphi_a + \mathbf{C}_{ss} \cdot d\varphi_s(t_1)/dt = \mathbf{E}_a$ определяется подвектор $\varphi_s(t_1)$.

Несмотря на то, что известны принципы выполнения каждого этапа решения уравнения (1), универсальный алгоритм устранения линейно зависимых строк матрицы емкостей для схем с произвольной топологической сложностью не встречается.

Научная новизна работы состоит в разработке алгоритма устранения линейно зависимых строк матрицы \mathbf{C} при топологически произвольном соединении конденсаторов.

Алгоритм устранения линейно зависимых строк матрицы емкостей состоит в следующем.

1. На этапе анализа структуры электрической цепи выделяется список незаземленных конденсаторов в форме множества

$$\mathbf{C}_{n.g} = \{(n_{1p}, n_{1m}), (n_{2p}, n_{2m}), \dots, (n_{ip}, n_{im})\},$$

где n_{ip}, n_{im} – положительный и отрицательный узлы i -го конденсатора.

2. Формируется ненаправленная матрица смежности $\mathbf{C}_{i.m}$ размерностью $N \times K$ для графа Γ_C , состоящего из незаземленных конденсаторов, где $K = |\mathbf{C}_{n.g}|$ – мощность множества $\mathbf{C}_{n.g}$. Электрическая цепь может иметь произвольное число таких графов, каждый из которых топологически может иметь различный вид: включать в себя деревья или циклы. Матрица смежности $\mathbf{C}_{i.m}$ содержит единицы в элементах с координатами (n_{ip}, j) и (n_{jm}, j) , где j – номер незаземленного конденсатора (элемента множества $\mathbf{C}_{n.g}$). Остальные элементы матрицы смежности $\mathbf{C}_{i.m}$ равны нулю.

Все действия алгоритма сопровождаются упрощением матрицы смежности $\mathbf{C}_{i.m}$ и одновременной модификацией матриц цепи \mathbf{G} , \mathbf{C} и векторов \mathbf{E} , φ так, чтобы в каждом столбце матрицы смежности $\mathbf{C}_{i.m}$ осталась только одна единица.

3. Определяются типы узлов графа Γ_C , инцидентных ветвям с конденсаторами. Узлы могут быть *концевыми* или *промежуточными*, для которых, соответственно:

$$\sum_{j=1}^K C_{i.m}(i, j) = 1 \text{ или } \sum_{j=1}^K C_{i.m}(i, j) > 1, \quad (6)$$

где i – номер узла; j – номер незаземленного конденсатора. Узлы i , неинцидентные ветвям с конденсаторами ($\sum_j C_{i.m}(i, j) = 0$), не рассматриваются.

Основная операция алгоритма состоит в вычитании из строк в матрицы смежности $\mathbf{C}_{i.m}$ с промежуточными узлами строк с концевыми узлами. Одновременно с этим выполняются сложения тех же строк в матрицах \mathbf{G} , \mathbf{C} и векторах \mathbf{E} и φ , что позволяет перейти, например, из системы уравнений (3) к системе уравнений (4). Указанные операции выполняются до тех пор, пока в матрице

смежности $C_{i,m}$ для каждого i -го узла $\sum_j C_{i,m}(i, j)$ станет равной 1 или 0. В этом случае каждый узел, инцидентный ветвям с незаземленными конденсаторами, будет учитываться в матрицах состояния лишь 1 раз, что исключает вырожденность матрицы C' в уравнении (5.2).

Если элемент матрицы смежности, равный единице $C_{i,m}(i, j) = 1$, является единственным ненулевым элементом в той же строке и том же столбце, то с i -м узлом и j -м конденсатором дальнейшие операции не требуются. Преобразования должны затрагивать только *дублированные концевые узлы*, для которых сумма элементов в столбцах

$$\sum_{i=1}^N C_{i,m}(i, j) = 2. \tag{7}$$

4. Если в матрице смежности $C_{i,m}$ имеются промежуточные и концевые дублированные узлы, определяемые по условиям (6) и (7), то для каждого промежуточного i -го узла выполняются следующие действия:

а) определяются элементы в i -й строке матрицы смежности $C_{i,m}$, равные единице $C_{i,m}(i, j) = 1$;

б) в каждом найденном j -м столбце проверяется наличие концевого узла;

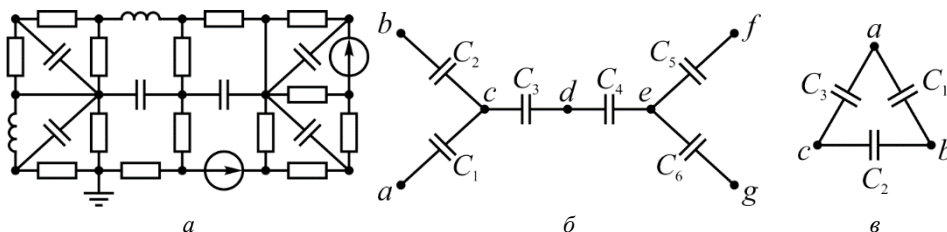
в) выполняется основная операция алгоритма для соответствующего i -го промежуточного и найденного концевого узла.

5. Если в матрице смежности $C_{i,m}$ имеются концевые дублированные узлы, но промежуточные узлы отсутствуют, то должны существовать конденсаторы, изолированные от других. В этом случае: а) определяются изолированные конденсаторы, для которых оба соответствующих узла являются концевыми; б) выполняется основная операция алгоритма для соответствующих концевых узлов; в) если изолированные конденсаторы отсутствуют, то алгоритм завершается.

6. Если отсутствуют дублированные концевые узлы, определяемые по условию (7), то алгоритм завершается.

Шаги 1 и 2 выполняются один раз, шаги 3–6 – итерационно до завершения алгоритма на шаге 5 или 6.

Пример. В качестве примера рассмотрим схему, изображенную на рисунке, *а*. Список незаземленных конденсаторов в этом случае будет иметь вид $C_{n,g} = \{(a, c), (b, c), (c, d), (d, e), (e, f), (e, g)\}$. Конденсаторы образуют граф, показанный на рисунке, *б*, не содержащий циклов. Пример циклического графа конденсаторов показан на рисунке, *в*.



Расчетная схема (*а*); древовидный граф конденсаторов (*б*); циклический граф (*в*)

Матрицы смежности $C_{i,m}$ для схем, показанных на рисунке, b и $в$, соответственно:

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
a	1					
b		1				
c	1	1	1			
d			1	1		
e				1	1	1
f					1	
g						1

	C_1	C_2	C_3
a	1		1
b	1	1	
c		1	1

В схеме, показанной на рисунке, b , узлы a , b , f и g являются концевыми, а узлы c , d , e – промежуточными. Все концевые узлы являются дублирующими – каждый конденсатор учитывается в матрицах состояния и матрице смежности дважды. В схеме, показанной на рисунке, $в$, нет концевых и, соответственно, дублирующих узлов. Матрицы состояния не имеют линейно зависимых строк, поэтому операции преобразования не требуются. Алгоритм завершается на шаге 6. Для схемы, показанной на рисунке, b , выполняется шаг 4. Одновременно с вычитанием строк матрицы смежности $C_{i,m}$ производятся сложения тех же строк матриц цепи G , C и векторов E и Φ . В результате матрица смежности примет вид

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
a	1					
b		1				
c	0	0	1			
d			1	1		
e				1	0	0
f					1	
g						1

На шаге 3 следующей итерации вновь определяются концевые дублирующие узлы – c , e и промежуточный узел d . Выполняется шаг 4, в результате матрица смежности приобретет вид

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
a	1					
b		1				
c			1			
d			0	0		
e				1		
f					1	
g						1

В результате определения типов узлов (шаг 3) на следующей итерации получаем, что согласно матрице смежности дублирующие концевые узлы отсутствуют, поэтому алгоритм завершается.

Разработанный алгоритм обеспечивает вхождение каждого незаземленного конденсатора в матрицы состояния электрической цепи, составленные согласно модифицированному методу узловых потенциалов, только 1 раз. Это позволяет исключить вырожденность матриц состояния и преобразовать систему дифференциальных уравнений цепи к форме задачи Коши.

Практическая значимость разработанного алгоритма состоит в эффективном способе устранения линейно зависимых строк матриц состояния цепи, что позволяет перейти от системы уравнений с потенциалами к системе уравнений с напряжениями и определить вектор неизвестных.

Алгоритм может применяться при расчетах электрических цепей с управляемыми и неуправляемыми ключами, индуктивно связанными контурами, усилителями и другими элементами электрических цепей. Соответствующие модификация алгоритма и оценка эффективности его применения в этих случаях могут составлять перспективу дальнейших исследований по обозначенной тематике.

Литература

1. Кинев Е.С., Тягин А.А., Пантелеев В.И., Первухин М.В. Реализация импульсно-кодированного управления в параметрических моделях индукционных устройств // *The Scientific Heritage*. 2021. № 63-1. С. 53–61.
2. Мильников А.И., Новиков В.В. Алгоритм моделирования диодно-резистивных схем // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 1-2 (43). С. 84–91.
3. Yildiz A.B. A MNA-based unified ideal switch model for analysis of switching circuits. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2013, vol. 22, no. 06. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218126613500461>.
4. Ho C.W., Ruehli A.E., Brennan P.A. The modified nodal approach to network analysis. *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 1975, vol. CAS-22, pp. 504–509.
5. Vega I., Riaza R. Hybrid analysis of nonlinear circuits: DAE models with indices zero and one. *Circuits Syst Signal Process*, 2016, vol. 32, pp. 2065–2095. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00034-013-9570-y>.
6. Altun K., Balkan T., Platin B.E. Extraction of state variable representations of dynamic systems employing linear graph theory. Proc. of Conf. «The sixth international conference on mechatronic design and modeling». Cappadocia, Turkey, 2002. DOI 10.13140/RG.2.2.29940.96647.
7. Mandache L., Topan D., Sirbu I.-G. Improved Modified Nodal Analysis of Nonlinear Analog Circuits in the Time Domain. Proc. of the World Congress on Engineering, 2010, June 30 – July 2, 2010, London, U.K. vol. II. Available at: https://www.researchgate.net/publication/45534515_Improved_Modified_Nodal_Analysis_of_Nonlinear_Analog_Circuits_in_the_Time_Domain.

ОРЛОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (karlorlov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

Alexandr I. ORLOV

ALGORITHM OF ELECTRIC CIRCUIT STATE MATRIX TRANSFORMATION USING THE MODIFIED NODAL ANALYSIS

Key words: Modified nodal analysis (MNA), circuit equation, mathematical and computer modeling, Cauchy problem, singular matrix.

The article proposes the algorithm of electric circuit state matrix transformation obtained by the modified nodal analysis. The algorithm is aimed at reducing the system of electrical circuit differential equations to Cauchy problem form for the purpose of subsequent solution. Application of the modified nodal analysis to an electric circuit with energy inertial elements leads to a system of ordinary differential equations, which contains a singular matrix before the derivatives vector in matrix form if there are ungrounded capacitors in a circuit. For this reason, direct reduction of this equations system to Cauchy problem form is impossible. The idea of solving such systems is to pass from equations with potentials to equations with voltages and subsequent division of the equations system into two pieces: containing derivatives and without them. An important step in the transformation to equations with voltages is the elimination of linearly dependent rows of the singular matrix. The algorithm of that transformation is based on the analysis of the adjacency matrix compiled for the capacitors of the electrical circuit, and is the subject of this work. The algorithm can be used for topologically arbitrary connection of an unlimited number of capacitors. For the purpose of demonstration, an example of using the algorithm is given in the article.

References

1. Kinev E.S., Tyapin A.A., Panteleev V.I., Pervukhin M.V. Implementation of pulse-code control in parametric models of induction devices [Realizatsiya impul'sno-kodovogo upravleniya v parametricheskikh modelyakh induktsionnykh ustroystv]. *The Scientific Heritage*, 2021, no. 63-1, pp. 53–61.
2. Mylnikov A.I., Novikov V.V. Algorithm modelirovaniya diodno-rezistivnykh skhem [Algorithm for modeling diode-resistive circuits]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2016, no. 1-2 (43), pp. 84–91.
3. Altun K., Balkan T., Platin B.E. Extraction of state variable representations of dynamic systems employing linear graph theory. Proc. of Conf. «The sixth international conference on mechatronic design and modeling». Cappadocia, Turkey, 2002. DOI 10.13140/RG.2.2.29940.96647.
4. Ho C.W., Ruehli A.E., Brennan P.A. The modified nodal approach to network analysis. *IEEE Tram. Circuits Syst.*, 1975, vol. CAS-22, pp. 504–509.
5. Mandache L., Topan D., Sirbu I.-G. Improved Modified Nodal Analysis of Nonlinear Analog Circuits in the Time Domain. Proc. of the World Congress on Engineering, 2010, June 30 – July 2, 2010, London, U.K. vol. II. Available at: https://www.researchgate.net/publication/45534515_Improved_Modified_Nodal_Analysis_of_Nonlinear_Analog_Circuits_in_the_Time_Doma.
6. Vega I., Rianza R. Hybrid analysis of nonlinear circuits: DAE models with indices zero and one. *Circuits Syst Signal Process*, 2016, vol. 32, pp. 2065–2095. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00034-013-9570-y>.
7. Yildiz A.B. A MNA-based unified ideal switch model for analysis of switching circuits. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2013, vol. 22, no. 06. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218126613500461>.

ALEKSANDR I. ORLOV – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Electromechanics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (karlorlov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

Формат цитирования: Орлов А.И. Алгоритм преобразования матриц состояния электрической цепи при использовании модифицированного метода узловых потенциалов // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 73–80. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-73-80.