


СЕКЦИЯ 4. Судовая электротехника

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-92-98

УДК 629.5.064:004.9

EDN: KQYUWD

Д.Н. Дураков¹ , В.В. Лобынцев¹, Д.В. Москвич², А.Н. Коновалов³

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²ФГКУ «12 ЦНИИ» МО РФ, Московская обл., Россия

³Министерство обороны Российской Федерации, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРАБЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

В современной геополитической обстановке обострилась необходимость в отечественном программном обеспечении для моделирования электротехнических устройств и систем при проектировании и расчетном обосновании проектных решений, создании тренажерных комплексов и цифровых двойников сложного бортового электрооборудования. В ходе разработки отечественного программного кода были получены положительные результаты алгоритмической реализации матричных вычислений высокой производительности, позволяющие на основе частных математических моделей электронной и электротехнической компонентной базы, формализованных в виде матричных заготовок, составлять схемы замещения произвольной топологии и выполнять численный анализ их работы, в том числе в режиме реального времени. Разработан и опробован программный комплекс, основанный на технологии численного моделирования.

Ключевые слова: численный анализ, моделирование, электроэнергетическая система, матричная заготовка, вычислительное ядро, аккумуляторная батарея.


Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SECTION 4. Ship electric engineering

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-92-98

UDC 629.5.064:004.9

EDN: KQYUWD

D. N. Durakov¹ , V. V. Lobyntsev¹, D. V. Moskvich², A. N. Konovalov³

¹National Research Centre „Kurchatov Institute“, Moscow, Russia

²Federal State-Owned Enterprise „12th TSNII“, MoD, Moscow Region, Russia

³Ministry of Defence, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR NUMERICAL MODELING OF SHIP ELECTRIC POWER SYSTEMS AND ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

Against the backdrop of current geo-political situation, it is vitally important to develop Russian software for modeling electro-technical devices and systems in feasibility studies of design options, development of simulation complexes and digital twins of sophisticated shipboard electric equipment. In the development of a home code some positive results have been achieved in

Для цитирования: Дураков Д.Н., Лобынцев В.В., Москвич Д.В., Коновалов А.Н. Разработка программного комплекса расчетного моделирования корабельных электроэнергетических систем и систем электродвижения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; Специальный выпуск 1: 92–98.

For citations: Durakov D.N., Lobyntsev V.V., Moskvich D.V., Konovalov A.N. Development of software for numerical modeling of ship electric power systems and electric propulsion systems. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; Special Issue 1: 92–98 (in Russian).

algorithmic implementation of high-performance matrix computations, which, based on specific mathematical models of electronic and electric components formalized as matrix templates, enable setting up of equivalent circuits of arbitrary topology and numerical analysis of their operation, including online analysis. A software product based on the numerical modeling techniques has been developed and tested.

Keywords: numerical analysis, modeling, electric power system, matrix template, compute core, battery.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Большинство современных программ позволяют выполнять:

- линейный анализ цепи постоянного тока для оценки токов и напряжений для линейной схемы с сосредоточенными элементами, не зависящей от времени;
- нелинейный анализ цепи постоянного тока для расчета установившегося режима схемы, содержащей нелинейные элементы, такие как диоды и транзисторы;
- анализ схемы переменного тока для получения частотной характеристики линейной схемы с сосредоточенными элементами, не зависящей от времени;
- анализ импульсного сигнала переменного тока для получения по отклику частотной характеристики схемы путем замены нелинейных элементов их линеаризованными эквивалентами, вычисленными из установившегося режима работы;
- анализ линейных переходных процессов для определения отклика схемы во временной области для различных входных сигналов с учетом начальных условий, полученных в результате анализа линейной цепи постоянного тока;
- анализ длительного переходного процесса для получения отклика в интервале времени для схемы, которая содержит нелинейные элементы, такие как диоды и транзисторы.

Безусловно, наиболее распространенным является нелинейный анализ цепей постоянного тока в установившемся режиме перед началом моделирования и последующего анализа длительного переходного процесса. Однако для реализации перечисленных выше возможностей обычно используется общее вычислительное ядро, поскольку все они основаны на алгоритме линейного анализа.

Методы

Methods

Расчет схем замещения, составленных из базовых элементов, базируется на модифицированном мето-

де узловых потенциалов [1]. Предположим, что имеется включенный в цепь между незаземленными узлами k и l источник ЭДС (рис. 1).

Напряжение U_{kl} между узлами k и l известно, поэтому оба узловых потенциала, φ_k и φ_l , принимаются в качестве независимых переменных. Для решения данной задачи необходимо ввести ток источника ЭДС – i_{kl} в качестве новой независимой переменной и добавить ограничение по уровню напряжения:

$$\varphi_k - \varphi_l = U_{kl}. \quad (1)$$

Таким образом, для $(n + 1)$ узла, в том числе нулевой (базовой) точки схемы с одним источником ЭДС, выраженным через U_{kl} с направлением от узла k узлу l , может быть получен следующий набор уравнений по модифицированному методу узловых потенциалов:

$$\begin{array}{cccccc} & \text{стб } 1 & \text{стб } k & \text{стб } l & \text{стб } n & \text{стб } n+1 \\ \text{стр } 1 & y_{11} & \dots & y_{1k} & \dots & y_{1l} & \dots & y_{1n} & 0 & \left[\begin{array}{c} \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_k \\ \vdots \\ \varphi_l \\ \vdots \\ \varphi_n \\ i_{kl} \end{array} \right] & = & \left[\begin{array}{c} I_1 \\ \vdots \\ I_k \\ \vdots \\ I_l \\ \vdots \\ I_n \\ U_{kl} \end{array} \right] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & & & \\ \text{стр } k & y_{k1} & \dots & y_{kk} & \dots & y_{kl} & \dots & y_{kn} & 1 & \varphi_k & I_k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \text{стр } l & y_{l1} & \dots & y_{lk} & \dots & y_{ll} & \dots & y_{ln} & -1 & \varphi_l & I_l \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \text{стр } n & y_{n1} & \dots & y_{nk} & \dots & y_{nl} & \dots & y_{nn} & 0 & \varphi_n & I_n \\ \text{стр } n+1 & 0 & \dots & 1 & \dots & -1 & \dots & 0 & 0 & i_{kl} & U_{kl} \end{array} \quad (2)$$

Элементы y и I представляют соответственно элементы Y -матрицы и J -вектора без включения источника ЭДС. Иными словами, (2) является эквивалентом матричной заготовки для источника ЭДС, где пунктирные линии указывают на увеличение исходной Y -матрицы и J -вектора, которые представляют собой обычные уравнения узловых проводимости:

$$\begin{array}{cccc} \text{стр } k & & & 1 \\ & Y & & \varphi \\ \text{стр } l & & & -1 \\ \text{стр } n+1 & 1 & -1 & 0 \end{array} \left[\begin{array}{c} \varphi \\ \vdots \\ i_{kl} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} J \\ \vdots \\ U_{kl} \end{array} \right] \quad (3)$$

стб k стб l стб $n+1$

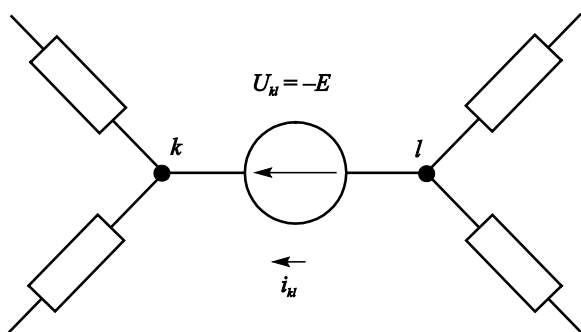


Рис. 1. Источник ЭДС между узлами k и l
Fig. 1. EMF source between units k and l

До тех пор, пока несколько независимых источников ЭДС не образуют замкнутые контуры, они могут рассматриваться аналогично, потому что каждый имеет простой набор матричных заготовок и добавляет новую строку и столбец в уравнения модифицированного узлового анализа. На главной диагонали Y -матрицы в позиции $(n + 1, n + 1)$ для систем уравнений (2) и (3) стоит ноль. Некоторые схемы одновременного решения уравнений могут рассчитывать на возможность деления элементов строки на соответствующий диагональный элемент, но решение этой проблемы кроется в замене строки k строкой n , что дает $+1$ в позиции (k, k) и $+1$ в позиции $(n + i, n + i)$ [2]:

$$\begin{array}{l}
 \text{стб } 1 \quad \text{стб } k \quad \text{стб } l \quad \text{стб } n \quad \text{стб } n+1 \\
 \text{стр } 1 \quad \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1k} & \cdots & y_{1l} & \cdots & y_{1n} & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_k \\ \vdots \\ \varphi_l \\ \vdots \\ \varphi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ U_{kl} \\ \vdots \\ I_l \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \\
 \text{стр } k \quad \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 1 & \cdots & -1 & \cdots & 0 & 1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \\
 \text{стр } l \quad \begin{bmatrix} y_{l1} & \cdots & y_{lk} & \cdots & y_{ll} & \cdots & y_{ln} & -1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \\
 \text{стр } n \quad \begin{bmatrix} y_{n1} & \cdots & y_{nk} & \cdots & y_{nl} & \cdots & y_{nn} & 0 \\ y_{k1} & \cdots & y_{kk} & \cdots & y_{kl} & \cdots & y_{kn} & 0 \end{bmatrix} \\
 \text{стр } n+1
 \end{array} \quad (4)$$

Теперь рассмотрим принцип формирования и решения линейных уравнений, описывающих электрические цепи по методу узловых потенциалов. Наиболее часто интерес представляет многократное решение матричных уравнений, для которых левая часть остается неизменной, но изменяется вектор правой части (называемый функцией принуждения, потому что содержит величины источников ЭДС и тока в цепи). Чтобы использовать эти случаи, когда левая часть не изменяется, необ-

ходимо выполнить LU -факторизацию матрицы проводимостей [3] вместо метода исключения Гаусса. Во время LU -факторизации необходимо работать только с левой частью матрицы без учета стимулирующего вектора правой части. Результаты LU -факторизации повторно могут быть эффективно использованы для решения систем уравнений с различными векторами правой части.

Например, начнем с уравнений узловой проводимости:

$$Y\varphi = J. \quad (5)$$

Предположим, что матрица узловой проводимости Y может быть разложена на произведение нижнетреугольных и верхнетреугольных матриц:

$$Y = \begin{bmatrix} \ddots & 0 \\ L & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddots & U \\ 0 & \ddots \end{bmatrix}, \quad (6)$$

при этом нижняя треугольная матрица имеет нули над главной диагональю, а верхняя треугольная матрица имеет нули под главной диагональю. Обычно главные диагональные элементы любой из этих матриц не равны нулю. При этом определитель Y равен произведению определителей $L \times U$. Следовательно, и L , и U не могут иметь все нули на своих главных диагоналях, чтобы определитель Y был отличным от нуля и, следовательно, чтобы уравнения имели решение.

Подставляя Y в (5), имеем:

$$LU\varphi = J. \quad (7)$$

Подставляем

$$x = U\varphi, \quad (8)$$

для получения

$$Lx = J. \quad (9)$$

Итак, сначала прямой заменой решаем нижнюю треугольную систему (9), чтобы получить x , а затем решаем верхнюю треугольную систему:

$$U\varphi = x, \quad (10)$$

чтобы обратной подстановкой получить окончательное значение φ .

В целом решение системы уравнений разбито на два этапа: LU -факторизацию, прямую и обратную подстановку. Однако необходимо признать, что полученный выше промежуточный вектор x является модифицированной правой частью матрицы в результате последовательного исключения Гаусса. Метод Гаусса обеспечивает комбинацию LU -факторизации и прямой замены. Разбивая последовательность шагов, появляется возможность

более эффективной работы с различными правыми частями.

Дальнейшая работа с матрицами сводится к их разреженности. Разреженная матрица – это матрица, которая имеет значение 0 для большинства элементов [4]. Если отношение числа нулевых элементов матрицы к ее размеру меньше 0,5, матрица является разреженной. Этот подход позволяет не хранить в памяти компьютера информацию о нулевых элементах матрицы и выполнять операции быстрее, чем при использовании плотных матриц, что особенно важно при работе с матрицами большого размера.

Для решения разреженных матриц используется один из самых быстрых на сегодняшний день решателей – *KLU* [5]. Данный решатель оснащен алгоритмами для решения несимметричных систем линейных уравнений и использует перестановку в блочную треугольную форму (*BTF*), несколько методов нахождения упорядочения, уменьшающего заполнение (*AMD*, *COLAMD*), и алгоритм разреженной левосторонней *LU*-факторизации Гилберта – Пайерлса (*Gilbert – Peierls*) [6] для факторизации каждого блока, а также компактным способом хранения ненулевых значений разреженной матрицы – сжатое хранение столбцом (*Compressed Sparse Column*) [7]. Как показано на рис. 2, матрица хранится в трех подмассивах: указатели индекса (*Index Pointers*), индексы (*Indices*) и значения (*Data*). Порядковый номер первого из пары смежных элементов в подмассиве указателей индекса является номером столбца матрицы, а разность значений второго и первого элемента этой пары – количеством ненулевых элементов в столбце разреженной матрицы. Подмассив индексов содержит номера строк ненуле-



Рис. 2. Иллюстрация принципа сжатого хранения столбцом

Fig. 2. Illustration of compressed sparse column storage principle

вых элементов матрицы, а подмассив значений – их значения.

Результаты. Для тестирования производительности вычислений использовалась схема, представленная на рис. 3. Увеличение производительности вычислений в зависимости от примененных методов показано в табл. 1.

В результате применения вышеописанных методов удалось добиться технической возможности выполнения расчетов для матриц размером до $10\,000 \times 10\,000$. Разумеется, производительность вычислений определяется производительностью компьютера, величиной шага расчета и количеством итераций. К примеру, выполнение моделирования в реальном времени достижимо на современных компьютерах для схемы, состоящей из 300 базовых элементов и источников при величине расчетного шага 5 мс.

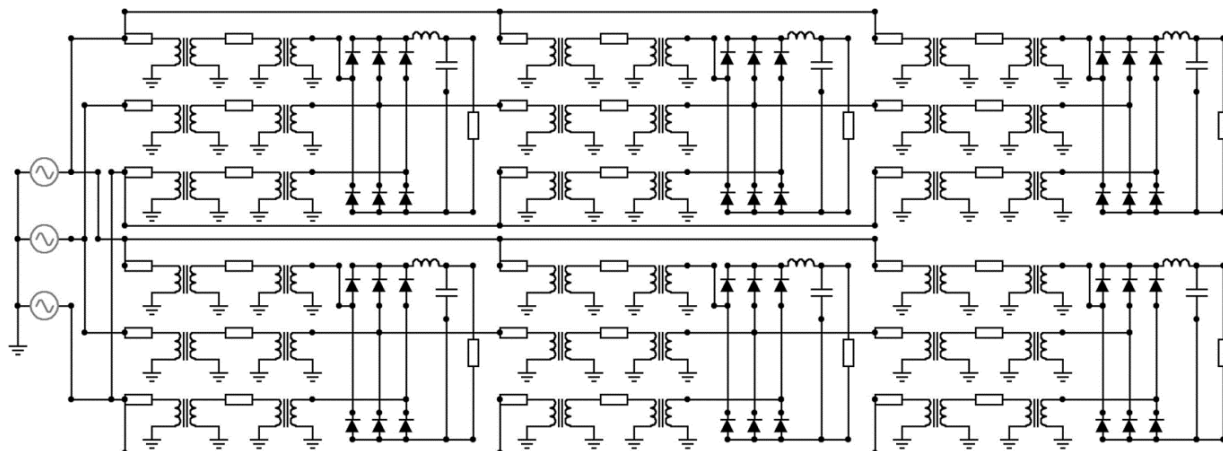


Рис. 3. Схема для тестирования производительности вычислений

Fig. 3. Setup for testing computational performance

Таблица 1. Увеличение производительности вычислений в зависимости от методов

Table 1. Improvement of calculation performance for different methods

Метод	Быстрее в x раз
Первоначальный метод, до удаления проводов-соединителей	1,00
CSparse, до удаления проводов-соединителей	49,48
Первоначальный метод, после удаления проводов-соединителей	5,32
CSparse, после удаления проводов-соединителей	87,68
<i>KLU</i> , после удаления проводов-соединителей	61,98
<i>KLU</i> + <i>BTF</i> , после удаления проводов-соединителей	58,68
<i>KLU</i> + <i>AMD</i> , после удаления проводов-соединителей	41,50
<i>KLU</i> + <i>AMD</i> + <i>BTF</i> , после удаления проводов-соединителей	178,00
<i>KLU</i> + refactor, после удаления проводов-соединителей	182,68
<i>KLU</i> + <i>BTF</i> + refactor, после удаления проводов-соединителей	179,70
<i>KLU</i> + <i>AMD</i> + refactor, после удаления проводов-соединителей	252,98
<i>KLU</i> + <i>AMD</i> + <i>BTF</i> + refactor, после удаления проводов-соединителей	375,14

В ходе разработки программного комплекса в его библиотеку было добавлено 130 элементов, разделенных на 12 категорий: идеализированные источники, промышленные источники, параметрические источники, линейные элементы, нелинейные элементы, полупроводниковые приборы, логические элементы, микросхемы, подсхемы и блоки, электромеханические нагрузки, а также прочие устройства. Как можно заметить из этого списка, большое внимание уделяется элементам-моделям, максимально приближенным к реальным эксплуатируемым устройствам. В частности, в библиотеке имеются элементы-модели аккумуляторных батарей различных типов. Данные модели используют вольт-джоулевые характеристики, снятые в ходе экспериментального разряда стабилизированным током при нормальных климатических условиях. С использованием этих характеристик, для выходного напряжения аккумуляторной батареи при произвольном изменении тока может быть записано универсальное выражение вида:

$$U_{AB}(t+\Delta t) \approx U_{AB} \times \left(A_{тек} \pm \sum_0^n (U_{AB}(t) - U_3(t)) \cdot i(t) \cdot \Delta t \right), \quad (11)$$

где $A_{тек} \in [A_{ном}; A_0]$ – текущее значение энергоемкости, Дж, « \pm » – направление протекания тока (« $-$ » – разряд, « $+$ » – заряд).

Независимо от характера нагрузки, выражение (11) с допустимой погрешностью вычислений на шаге Δt позволяет довольно точно описывать изменение выходного напряжения на клеммах аккумуляторных батарей (рис. 4). Однако при достижении нулевых значений запасенной энергии остаточное напряжение на ее присоединительных клеммах не равно нулю, поэтому в отсутствие заряда батарея должна быть отключена. Отключение также должно выполняться при достижении $A_{ном}$, т.е. при полном заряде.

В отличие от процесса разряда, который происходит при полном приложенном напряжении к нагрузке R_n (рис. 5а), заряд аккумуляторной батареи имеет свои специфические особенности, выражающиеся в разности внешнего приложенного напряжения $U_3(t) = E_3 - i(t)r_3 - L_3 di/dt$ и остаточного напряжения на ее клеммах (рис. 5б).

Схема на рис. 5б также наглядно иллюстрирует процесс работы аккумуляторной батареи на нагрузку с противо-ЭДС. Если $U_3(t)$ по абсолютной величине становится больше $U_{AB}(t)$, то разность в скобках выражения (11) под оператором суммы становится отрицательной, однако при этом направление тока меняется на противоположное и энергия начинает расти, порционно прибавляясь к $A_{тек}$. При равенстве значений $U_3(t)$ и $U_{AB}(t)$ приращение энергии обращается в ноль. Процесс обмена энергиями также характерен при включении аккумуляторных батарей в параллель, когда они формируют собственные контуры протекания уравнивающего тока в ходе самобалансировки.

Рис. 4. Изменение напряжения на клеммах: Li-Co аккумуляторного модуля, 22ТНЖ и стартерной свинцово-кислотной батареи

Fig. 4. Voltage variations across terminals: Li-Co battery module, 22TNZh and lead/acid starter battery

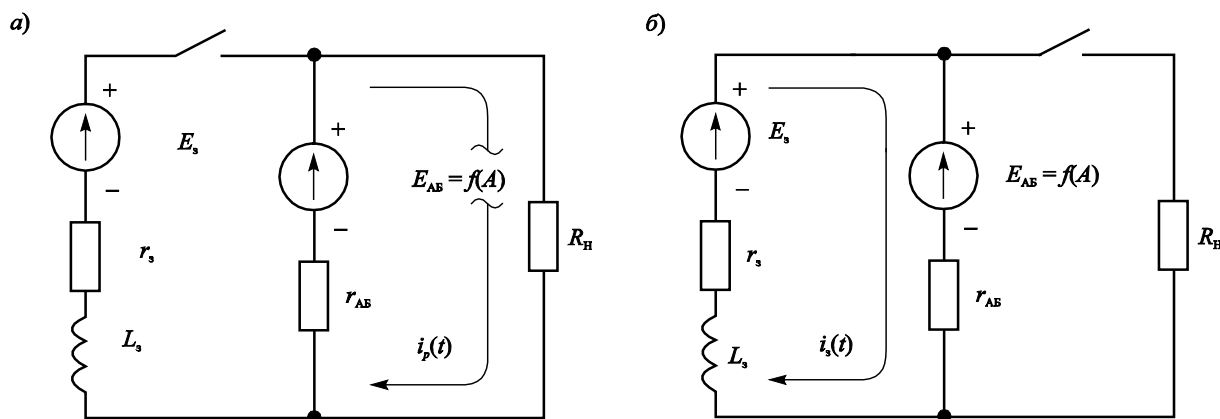
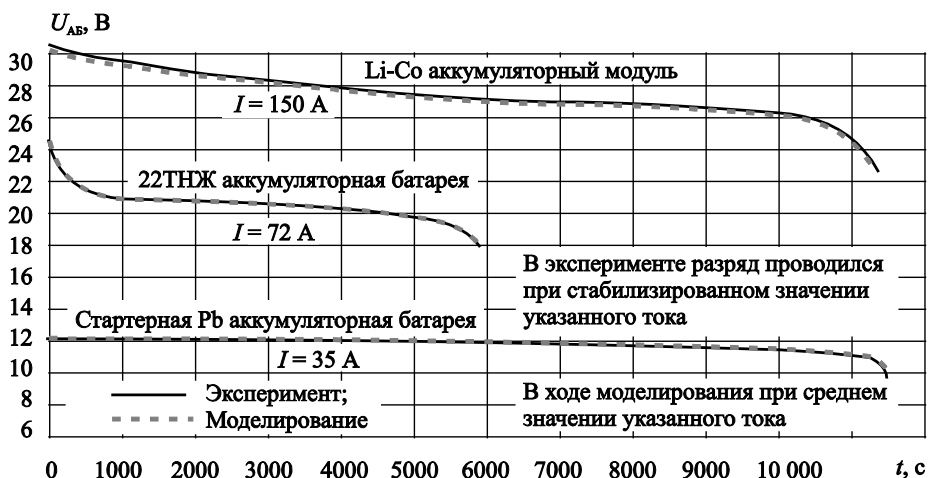


Рис. 5. Схема, поясняющая особенности разряда (а) и заряда (б) аккумуляторной батареи

Fig. 5. Circuit explaining battery discharging (a) and charging (b)

Сделанные выше теоретические выкладки на основе экспериментальных данных позволяют закладывать в расчеты специфические особенности реальных аккумуляторных батарей. Более того, корректно учитывать неравномерность разряда по времени в связи с ростом и снижением потребления электрической энергии, отдаваемой в сеть.

Заключение

Conclusion

Вопросы создания моделирующих комплексов носят комплексный характер, вмещающая в себя значительный объем теоретических и фундаментальных исследований, а также вопросы экспериментальной отработки с целью валидации вычислений. Проведенные исследования открыли возможность широкого использования матричных

методов вычислений с представлением отдельных элементов схемы замещения в качестве самостоятельных матричных заготовок, интегрируемых в общее вычислительное ядро. Такой подход, базирующийся на методе узловых потенциалов, обеспечил высокую производительность вычислений при прочих равных условиях, а также их достоверность с приемлемой погрешностью вычислений на уровне 3% в сравнении с результатами натуральных экспериментов.

Список использованной литературы

1. Ho C.W., Ruehli A.E., Brennan P.A. The Modified Nodal Approach to Network Analysis // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1975. Vol. 22, No. 6. P. 504–509. DOI: 10.1109/TCS.1975.1084079.

2. *Pillage L.T., Rohrer R.A. Visweswariah C.* Electronic circuit and system simulation methods. New York : McGraw-Hill, 1995. IX, 392 p.
3. *Тыртышников Е.Е.* Матричный анализ и линейная алгебра : учебное пособие. Москва : Физматлит, 2007. 477 с.
4. *Писсанецки С.* Технология разреженных матриц. Москва : Мир, 1988. 410 с.
5. *Davis T.A., Natarajan P.E.* Algorithm 907: KLU, A Direct Sparse Solver for Circuit Simulation Problems // ACM Transactions on Mathematical Software. 2010. Vol. 37, No. 3. P. 36 (p. 1–17). DOI: 10.1145/1824801.1824814.
6. *Gilbert J.R., Peierls T.* Sparse partial pivoting in time proportional to arithmetic operations // SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing. 1988. Vol. 9, No. 5. P. 862–873. DOI: 10.1137/0909058.
7. *Timothy A.D.* Direct Methods for Sparse Linear Systems. Philadelphia : SIAM, 2006. XII, 217 p.

References

1. *Ho C.W., Ruehli A.E., Brennan P.A.* The Modified Nodal Approach to Network Analysis // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1975. Vol. 22, No. 6. P. 504–509. DOI: 10.1109/TCS.1975.1084079.
2. *Pillage L.T., Rohrer R.A. Visweswariah C.* Electronic circuit and system simulation methods. New York : McGraw-Hill, 1995. IX, 392 p.
3. *Tyrtysnikov E.E.* Matrix analysis and linear algebra: handbook. Moscow: Fizmatlit, 2007. 477 p. (in Russian).
4. *Pissanetzky S.* Sparse Matrix Technology. Moscow. Mir. 410 p. (translation from English).
5. *Davis T.A., Natarajan P.E.* Algorithm 907: KLU, A Direct Sparse Solver for Circuit Simulation Problems // ACM Transactions on Mathematical Software. 2010. Vol. 37, No. 3. P. 36 (p. 1–17). DOI: 10.1145/1824801.1824814.
6. *Gilbert J.R., Peierls T.* Sparse partial pivoting in time proportional to arithmetic operations // SIAM Journal on

- Scientific and Statistical Computing. 1988. Vol. 9, No. 5. P. 862–873. DOI: 10.1137/0909058.
7. *Timothy A.D.* Direct Methods for Sparse Linear Systems. Philadelphia : SIAM, 2006. XII, 217 p.

Сведения об авторах

Дураков Дмитрий Николаевич, научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт». Адрес: 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1. E-mail: durakov_dn@nrcki.ru. <https://orcid.org/0009-0007-9960-7863>.

Лобынцев Владимир Васильевич, к.т.н. НИЦ «Курчатовский институт». Адрес: 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1. E-mail: lobyntsev_vv@nrcki.ru.

Москвич Дмитрий Владимирович, инженер ФГКУ «12 ЦНИИ» МО РФ. Адрес: 141307, Россия, Московская обл., Сергиев Посад, Весенняя ул., д. 26. E-mail: moskwich3000@mail.ru.

Коновалов Александр Николаевич, военнослужащий, Министерство обороны Российской Федерации. Адрес: 119160, Россия, Москва, ул. Знаменка, д. 19. Тел. +7 (495) 696-02-34.

About the authors

Dmitry N. Durakov, Junior Researcher, National Research Centre „Kurchatov Institute“. Address: 1, Academician Kurchatova pl., Moscow, Russia, post code 123182. E-mail: durakov_dn@nrcki.ru. <https://orcid.org/0009-0007-9960-7863>.

Vladimir V. Lobyntsev, Cand. Sci. (Eng.), National Research Centre „Kurchatov Institute“. Address: 1, Academician Kurchatova pl., Moscow, Russia, post code 123182. E-mail: lobyntsev_vv@nrcki.ru.

Dmitry V. Moskvich, Engineer, Federal State-Owned Enterprise „12th TSNII“, MoD. Address: 2b. Vesenniaia st., Moscow Region, Russia, post code 141307. E-mail: moskwich3000@mail.ru.

Aleksander N. Konovalov, military man, Ministry of Defence. Address: 19, Znamenka st., Moscow, Russia, post code 119160. Tel.: +7 (495) 696-02-34.

Поступила / Received: 13.07.23
Принята в печать / Accepted: 27.07.23
© Коллектив авторов, 2023