



УДК 621.311

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕНЗОРНОГО МЕТОДА

Р.Г. Оганян, М.В. Ланкин, О.Н. Головченко, roman.work18@gmail.com

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)

имени М.И. Платова, г. Новочеркасск

В данной статье представлен анализ существующих подходов к построению моделей на основе тензорной методологии. Для исследования сложных технических систем предлагается использовать метод диакоптики, который включает в себя тензорную методологию. К тому же диакоптика позволяет рассчитывать системы по частям, что является важным фактором при исследовании сложных технических систем. В качестве примера сложной технической системы рассмотрена цифровая подстанция, которая является инновационным уровнем автоматизации традиционных подстанций. Сложная техническая система объединяет в себе процессы, имеющие как мультифизический, так и мультидисциплинарный характер. Диакоптика позволяет исследовать подобные системы по частям на унифицированном языке электротехнике, а благодаря использованию тензорной методологии позволяет распространять полученное решение на подобные системы.

Ключевые слова: цифровая подстанция, тензорный метод, диакоптика, системный анализ.

EXISTING APPROACHES TO THE CONSTRUCTION OF MODELS BASED ON THE TENSOR METHOD

R.G. Oganian, M.V. Lankin, O. N. Golovchenko

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk

This article presents an analysis of existing approaches to the construction of models based on tensor methodology. For the study of complex technical systems it is proposed to use the method of diakoptiki, which includes a tensor methodology. In addition, diakoptika allows you to calculate the system in parts, which is an important factor in the study of complex technical systems. As an example of a complex technical system, a digital substation is considered, which is an innovative level of automation of traditional substations. A complex technical system combines processes that are both multiphysical and multidisciplinary in nature. Diakoptika allows you to explore such systems in parts in a unified language of electrical engineering, and through the use of tensor methodology allows you to extend the resulting solution to such systems.

Key words: digital substation, tensor method, diakoptics, system analysis.

Известно, что электрическая подстанция является неотъемлемой частью обеспечения электроснабжения. Учитывая, стремительное развитие информационных технологий и применение их в различных областях науки и техники, изменения также коснулись и подстанций. Новый уровень автоматизации электрической подстанции является цифровой подстанция [1-6]. Согласно I конференции «Цифровая сеть», не смотря на проработанные методы диагностики традиционных подстанций, требуется разработка комплексных подходов к диагностике [7]. Цифровая подстанция является сложной технической системой, которая, как и другие сложные технические системы учитывает электрические, магнитные, температурные механические и иные процессы, имеющие как мультифизический (в рамках одного компонента), так и мультидисциплинарный (на стыке компонентов) характер. Это приводит к тому, что сложные системы различных областей науки и техники, сильно отличаются друг от друга. В следствие значительного отличия принято, что для каждой из них необходимо разрабатывать свои методы исследования и расчета, однако у сложных систем немало общего. Все технические системы состоят из элементов, которые обладают теми или иными материальными свойствами и при этом образуют структуру. Воздействия на систему вызывают в ней отклики, которые зависят как от величины воздействий, так и от свойств элементов. Применительно, к электрическим подстанциям, в общем случае



они практически идентичны и исходя из этого, исследовав режим для одной подстанции, его можно масштабировать на другие подстанции. Основным методом, обеспечивающим получение решения и его распространение на частные случаи, является тензорный метод.

Например, в [8] тензорный анализ используется для точного решения задачи об изменении свойств оптического волокна, которое сводится к нахождению тензоров напряжения при одностороннем поперечном сжатии при продольно-поперечной нагрузке. В [9] осуществляется математическое моделирование сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых асинхронных двигателях с поврежденной обмоткой ротора. Приведена методика вычисления нормальной и тангенциальной составляющих тензора магнитного натяжения. В [10] рассматривается возможность и необходимость применения методов тензорного анализа при построении и функционировании логистического контроллинга как сложной системы. Применительно к [10], на языке тензорного анализа можно получить уравнения, которые представляют характеристики самых разнообразных экономических потоков. Однажды полученные тензорные уравнения позволяют находить уравнения поведения или характеристик любого частного потока. Эта гибкость тензоров позволит работнику службы логистического контроллинга при изучении разнообразнейших характеристик потоков выделить одну, которая имеет наиболее простую структуру, и изучать свойства только этой частной характеристики.

Однако в системе возникают процессы (потоки энергии), которые, меняются и при изменении структуры связей элементов системы. Например, в [11] рассматриваются вопросы построения модели данных информационно-аналитической системы с применением тензорной методологии для анализа структур данных.

По отношению к цифровой подстанции, важным является не только расчет отдельной подстанции и получение соответствующий уравнений с последующим их применением к другим подстанциям, но и учет взаимовлияния работы подстанций. Подход, использующий как структурную информацию, так и параметрическую на базе тензорного метода и системный анализ к исследуемой системе получил название диакоптика [12]. Диакоптику, как метод моделирования в разных областях с помощью эквивалентных электрических цепей и расчета по частям, в 50–60-е годы разработал Крон, а затем развивали другие ученые [13–18].

Диакоптика позволяет моделировать сложные технические системы, которые носят мультифизическую природу на едином языке электротехники, и при этом, важной особенностью данного подхода является расчёт системы по частям. Однако диакоптика не получила широкого распространения в связи со сложностью ее понимая. Несмотря на указанную проблему существуют исследования, связанные с применением диакоптики, например, для анализа надежности программного обеспечения [19], для коррекции установившегося режима электроэнергетической системы [20], для анализа связи метода конечных элементов и метода диакоптики [21].

Метод расчленений основан на том, что система разделяется на соответствующее число малых подсистем, затем каждая подсистема анализируется и рассчитывается отдельно, как если бы остальные подсистемы не существовали, затем частные решения соединяются шаг за шагом до тех пор, пока не будет получено решение для всей системы. Решения частей соединяет в целое сеть пересечений, которая состоит из ветвей, связывающих подсети. В местах сечения возникает ряд сил связи, до этого



скрытых и главная цель диакоптики состоит в том, чтобы заставить в явном виде работать силы связи, которые бывают скрыты при обычных подходах. Расчет по частям этим методом получается без итераций.

Модель представляет собой линейный граф, некоторым ветвям которого приписаны значения импедансов (рис. 1) [12].

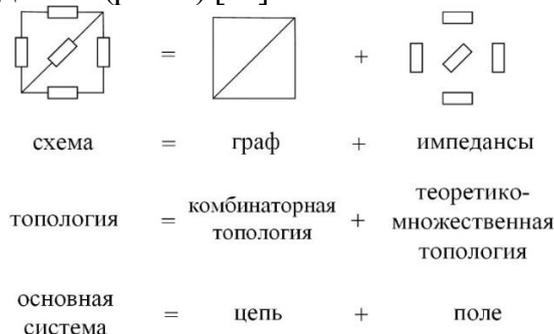


Рис. 1 – Составные части цепи

Процесс прохождения электрического тока в цепи описывается законом Ома (с его обобщением на комплексные сопротивления). Структуру и ее преобразования описывают законы Кирхгофа. В такой блок-схеме могут использоваться отрицательные, нелинейный и другие произвольные алгебраические функции, так как модель не обязательно физически реализуема. Расчленяемые системы могут быть линейными и нелинейными, статическими или динамическими. Решения могут быть точными или полученными с помощью метода возмущения или другого приближенного метода. Все математические операции выражаются в виде матричных преобразований.

Самый общий алгоритм расчета электрических цепей методом диакоптики Крона может быть представлен последовательностью следующих пяти шагов:

- исследуемая цепь (ее топологическая модель) делится на m подцепей, которые образуют “элементарную” систему координат;
- составляются и решаются уравнения состояния каждой из подцепей;
- строится цепь пересечений и составляются ее уравнения;
- определяется решение цепи пересечений;
- из полученных решений подцепей и цепи пересечений комбинируется решение цепи в целом.

Одной из практически наиболее важных особенностей тензорного анализа, используемого в диакоптике, является его способность разделять задачи функционально на части (протекание физических процессов различной природы). Данный подход следует применять, когда система является лишь частью еще большей системы. Следует отметить, что для электрических цепей запись тензорных уравнений эквивалентна записи их в матричной форме, так как при анализе электрических цепей имеют дело с одно- и двухвалентными тензорами, операциям над которыми соответствуют аналогичные операции над матрицами.

Первым важным условием и ключевым понятием тензорного анализа (величина, остающаяся инвариантной при преобразованиях) сетей является постулат Крона об инвариантности мощности при изменении структуры сетей, например, при соединении ветвей. Однако при наложении связей мощность меняется. Этот физический факт доказывается в теории графов теоремой Волавера [22]. Допол-



нительно к этому, вывод формул тензорного анализа сетей Крона содержит недопустимые действия, поскольку он основан на обращении прямоугольной матрицы, но Крон закрывал глаза на этот промежуточный шаг в вычислениях. Несмотря на это, диакоптика использовалась при решении многих задач и доказал свою эффективность [17].

В качестве простого примера связи структуры и процесса Крон исследовал преобразования токов и напряжений при изменении соединений одномерных проводников электрического тока. Для этого он ввел понятие примитивной сети. Под примитивной контурной цепью подразумевается "множество n отдельных ветвей, каждая из которых короткозамкнута на себя" (рис. 2). Можно образовать два типа примитивных цепей для заданного набора из n ветвей: примитивная контурная (рис. 2, а) и примитивная узловая (рис. 2, б).

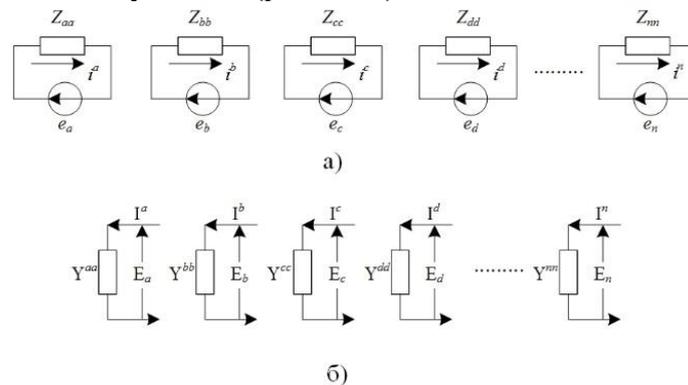


Рис. 2 – Примитивная сеть:

а) примитивная контурная сеть; б) примитивная узловая сеть

На рис. 3 представлен пример расчленения системы, на базе расщепления ветвей $p-t$ и $r-s$. Матрица преобразования при переходе от простейшей системы координат к другой системе определяется на основе равенства токов в ветвях “примитивной” и исходной цепей.

Связь между токами во всех отдельных ветвях выражается в (1), а в (2) - зависимость между напряжениями и токами.

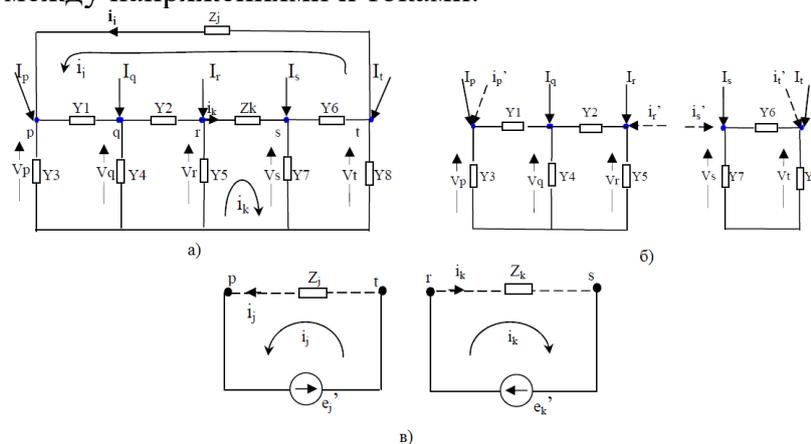


Рис. 3 – Пример расчленения схемы:

а) исходная сеть; б) подсети; в) сеть пересечений



$$\begin{bmatrix} i'_p \\ i'_q \\ i'_r \\ i'_s \\ i'_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_j \\ i_k \end{bmatrix} \Rightarrow i'_a = C_{ac} i_c \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} Z_k & 0 \\ 0 & Z_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_j \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e'_j \\ e'_k \end{bmatrix} \Rightarrow Z_{cc} i_c = e'_c \quad (2)$$

Таким образом, “примитивная цепь” представляет собой расчлененную исследуемую цепь, причем, очевидно, что степень расчленения исходной цепи может быть различной. Следовательно, метод диакоптики позволяет найти по решениям одной цепи, состоящей, например, из n отдельных подцепей, решение другой более сложной цепи, состоящей из взаимосвязанных любым образом n подцепей.

Вместе с тем, применение диакоптики к анализу сложных технических систем связано с рядом дополнительных задач, требующих своего решения (разработка и построение математических моделей и алгоритмов объединения решений отдельных подсистем, автоматическое формирование граничных уравнений - уравнений цепи пересечений, учет особенностей уравнений состояния подсистем и т.д.).

Таким образом, предлагается применение диакоптики к расчету сложных технических систем на примере цифровых подстанций. Использование данного подхода позволит оценить текущее состояние подстанции, с учетом влияния смежных подстанций, а также масштабировать полученное решение на другие подстанции. К тому же важным свойством диакоптики, является возможность рассмотрения исследуемой системы как части еще большей системы, что позволит рассматривать части электрической сети.

Результаты работы получены при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе У.М.Н.И.К. Работы были выполнены с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГПУ(НПИ).

Список цитируемой литературы

1. Дубров В.И., Оганян Р.Г., Шайхутдинов Д.В., Кириевский Е.В., Круглова Т.Н., Наракидзе Н.Д. Методы и подходы определения технического состояния цифровых электроподстанций // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 9. – С. 16-20.
2. Дубров В.И., Оганян Р.Г., Шайхутдинов Д.В., Кириевский Е.В., Горбатенко Н.И., Наракидзе Н.Д. Разработка математических моделей цифровых подстанций на базе анализа автоматизированных технологических систем преобразования электроэнергии // *Современные наукоемкие технологии*. – 2016. – №9. – С. 36-40.
3. Oganyan R. G., Narakidze N. D., Shaykhutdinov D. V., Gorbatenko N. I. and Maksuta S. O. Implementation of inverse calculation method in diagnostics of digital electric substations // 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 177.
4. Dubrov V.I., Oganyan R.G., Narakidze N.D. and Aleksanyan G.K. On the Mathematical Simulation of Digital Substation Technological Processes. 2017. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12: 276-282.
5. Dubrov V. I., Oganyan R. G., Shaykhutdinov D. V. To the choice of the principle functioning diagnostic system of digital substations // 2016 2nd International conference on industrial engineering, applications and manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings. – 2016.
6. Oganyan R. G. Narakidze N.D., Shaykhutdinov D.V. Method of two-stage complex diagnostics of digital substations on the basis of the full-scale-model tests // 2017 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings. – 2017.
7. I конференция «Цифровая сеть» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/11/24/i-konferentsiya-tsfirovaya-set/> (дата обращения 22.10.2018).



8. Аграфонов Ю.В., Липов Д.Б., Малов А.Н., Овчинкин А.В. Проблемы эксплуатации волоконно-оптических систем связи // Компьютерная оптика. – 1999. – С. 159-164.
9. Васьяковский Ю.Н., Гераскин А.А., Чумак В.В. Математическое моделирование сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых асинхронных двигателях с поврежденной обмоткой ротора // Энергия - XXI век. 2011. № 1 (79). С. 17-24.
10. Григорьева Н.В. Применение методологии тензорного анализа в логистическом контроллинге // Транспортное дело России. 2014. № 4. С. 66-67.
11. Попова Н. А. Построение модели данных с применением тензорной методологии // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5.
12. Крон, Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика / Г. Крон. – М.: Наука, 1972.
13. Сохор Ю.Н., Козаченко Е.Г., Фиронов А.Н. Тензорное моделирование режимов линейных двигателей для транспорта на магнитном подвесе. – В кн.: Тензорные методы анализа и синтеза сложных систем. – Ижевск, 1991.
14. Кутергин В.А. Искусственные объекты и конструктивные процессы. Введение в методологию и теорию. – Ижевск: Изд-во ИПМ Уро РАН: 2007. – 551 с.
15. Котарова И.Н., Шамаева О.Ю. Параллельный метод диакоптики для решения сложных задач на распределенных вычислительных системах. // Кибернетика, 1979, № 1. – С. 112–119.
16. Bowden K. Kron's Method of Tearing on the Transputer // The SERC/DTI Initiative in the Engineering Applications of Transputers. – v. III, May 1988.
17. Петров А.Е. Тензорный метод двойственных сетей / А.Е. Петров – М.: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании» 2007. – 496 с.
18. Хэпп Х. Диакоптика и электрические цепи. М.: Мир, 1974.
19. Колесов К. В. Использование метода диакоптики для анализа надежности программного обеспечения // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2009. – С. 51-53.
20. Бадалян Н.П., Чащин Е.А., Балашова С.А. Коррекция установившегося режима электроэнергетической системы сочетанием теоремы Телледжена и декомпозиции-диакоптики // Интернет-журнал Науковедение. – 2016.
21. Кравченко Г.М., Литовка В.В., Манойленко А.Ю. Метод диакоптики в расчетах высотных зданий // Проблемы, перспективы и направления инновационного развития науки. 2017. - С. 59-63.
22. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы: Пер. с англ. /ред. В.А.Горбатов. – М.: Мир, 1984. – 455 с.