

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

О. Ю. Кимстач

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Аннотация. Проанализированы проблемные моменты структурной оптимизации в электромеханике и электротехнике. Предложены подходы к формализации задачи синтеза оптимальной структуры объектов проектирования. Проанализированы зависимости параметров структуры от сложности функциональных задач. Сформулированы теоремы оптимумов связей и структуры. Предложен обобщенный алгоритм синтеза оптимальной структуры объектов электромеханики и электротехники.

Ключевые слова: структурный синтез, оптимизация, проектная процедура, теорема оптимума связей, теорема оптимума структуры, обобщенный алгоритм, объекты электромеханики и электротехники.

Введение

Развитие электромеханики требует применения современных методов и средств проектирования и изготовления электромеханических систем и преобразователей. Использование автоматизированных систем проектирования и производства стало неотъемлемой частью работы современных проектных организаций и электромеханических и электротехнических предприятий.

В основе автоматизированного проектирования лежит процесс выполнения проектных процедур и операций, среди которых важное место занимают структурный синтез (СС) и, соответственно, структурная оптимизация (СО) [1].

Наименее автоматизированным этапом проектирования является синтез структуры, который выполняется вручную или в диалоговом режиме [2]. Что отражает слабость методологических и формальных основ данного этапа проектирования.

Приступая к рассмотрению СС или СО прежде всего необходимо определить понятие «структура».

Структура – отображение совокупности элементов системы и их взаимосвязей без конкретизации значений их параметров [1]. Следовательно, целью СО является поиск такой структуры объекта проектирования (ОП), при которой количество его элементов и связей будет минимальным. При этом критерий СО – комплексный критерий, состоящий из двух частных критериев: количества элементов и связей. Гораздо сложнее определить независимые переменные при СО, т. к. набор элементов и их взаимосвязи определя-

ются функциональными задачами ОП, прописанными в техническом задании. Поэтому большее значение имеет алгоритм формирования структуры объекта, его выбор определяет ее оптимальность, но задать независимые переменные для формализации задачи СО не представляется возможным. Данная проблема обозначила подмену прямой задачи СО сравнительным анализом различных вариантов структур ОП, который предусматривает сравнение оптимальных параметрических решений для возможных структурно-конструктивных предложений ОП. Зачастую такие аналитические операции называются СО, что с семантической точки зрения принципиально неправильно.

Ярким примером подмены СО сравнительным анализом результатов параметрической оптимизации (ПО) является работа [3], в которой рассматривается вопрос определения геометрического синтеза электромагнитных статических преобразователей. Следует отметить, что количество элементов и их взаимосвязи во всех конструктивных схемах не меняются, варьируется лишь их взаимное геометрическое размещение и геометрические формы, что фактически есть основа для ПО. Так, активная часть планарного трехфазного стержневого трансформатора большой мощности имеет одиннадцать элементов: три стержня, три первичных и три вторичных обмотки, два яра. Аналогичный элементный состав присутствует у трансформатора пространственной конструкции с цельными витыми ярами, а при сборных ярах – количество элементов и, соответственно, связей возрастает. При малых мощностях возможно применение для планарных трансформаторов Ш-образных магнитопроводов, тогда количество элементов и связей становится не в пользу трансформаторов

© Кимстач О. Ю., 2017

пространственной конструкции. Следовательно, с точки зрения структуры планарные трансформаторы не хуже, а при некоторых ограничениях лучше, чем трансформаторы с пространственной конструкцией.

Но автор, получив ЦФ с независимыми переменными в виде относительных геометрических размеров, считает это СО, хотя правильнее было бы назвать геометрической оптимизацией, как это сделано в работе [4].

В работе [5] СО определяется тремя критериями: топологией, формой и размерами, и предусматривает разделение на три варианта ее реализации:

- оптимизация размеров, направленная на поиск оптимальных размеров ОП при сохранении его топологии и формы;

- оптимизация формы, предназначенная для поиска оптимальной формы при сохранении структуры ОП;

- топологическая оптимизация, используемая для поиска оптимальной топологии [5].

Фактически главенствующей является топологическая оптимизация, которая в конечном итоге определит и форму и размеры ОП, а оптимизация размеров и формы выступают в роли дополнительных средств СО и могут быть сведены к задачам ПО. Поэтому такое разделение скорее может рассматриваться как подмена понятий.

В работе [6] задача структурной оптимизации определена как достижение улучшения показателей ОП за счет изменения структурной схемы, но при этом не даются четкие пути решения такой задачи.

В [7] отмечается неразрывность структурной и параметрической оптимизации. Так, для структурной оптимизации путем сравнения характеристик альтернативных структур необходимо знать параметры ОП, а для расчета параметров необходимо выполнить параметрическую оптимизацию, которая требует наличия четко описанной структуры объекта. Разорвать данный круг можно только начав с формирования перечня возможных структурных реализаций ОП, что приемлемо при проектировании достаточно простых устройств и систем. При этом алгоритм формирования альтернативных структур ОП будет определяющим, и в таком случае многое зависит от его объективности и достоверности.

В ряде случаев СО интегрируется в процедуру структурного синтеза, который изначально должен выдавать оптимальную структуру ОП, т. е. вводится понятие оптимального структурного синтеза [8].

Целью структурного синтеза является со-

здание описания ОП, содержащее сведения о составе элементов, их взаимосвязях и отображающее функциональные требования к ОП [1]. Но подобная задача не проще СО, так как тоже трудно поддается формализации и обобщению. Наиболее универсальным средством структурного проектирования являются эволюционные методы, основанные на статистической обработке данных, полученных при итерационном приближении [1, 9]. Наибольший интерес представляют генетические методы и алгоритмы, основанные на поиске наилучших решений путем сравнения полезных свойств ОП, полученных в процессе имитации их эволюции [1, 10, 11]. Но для сложных разветвленных гетерогенных систем и объектов подобный метод становится чрезмерно громоздким и требует обработки больших объемов информации. Поэтому генетические методы могут быть использованы для получения простейших вариантов структуры ОП в общем виде, как своеобразного первого приближения.

Иногда синтез структуры рассматривается как выбор типа обмотки, исполнения по степени защиты, охлаждения и способу монтажа и т. д. [12]. На самом деле большинство таких параметров указываются в техническом задании или определены условиями, в которых планируется эксплуатация ОП.

Таким образом, разработка некоторых универсальных и объективных подходов к реализации проектной процедуры структурного синтеза в электромеханике и электротехнике является достаточно *актуальной задачей*.

Цель работы

Формирование методологической основы получения оптимальных структур проектируемых объектов электромеханики и электротехники.

Формализация задачи структурного синтеза

Решение любой задачи оптимизации начинается с формирования целевой функции, следовательно, необходимо получить целевую функцию (ЦФ) для СО.

Как отмечалось выше, ЦФ для СО определяет зависимость количества элементов и связей между ними, которые необходимо минимизировать, но главная проблема – идентификация независимых переменных (НП).

Очевидно, что количество элементов определяется, прежде всего, функциональными задачами ОП, а количество связей зависит от количества элементов и функциональных задач. Поэтому из чисто математических соображений целе-

сообразно в качестве НП выбирать функциональные задачи, которые получаются путем декомпозиции общих функциональных задач ОП, прописанных в техническом задании. Обеспечить оптимальную функциональную декомпозицию и сформировать ее математические оценки с объективной точки зрения также невозможно.

Для поиска объективно оптимального варианта необходимо рассмотреть все возможные варианты декомпозиции вплоть до элементарных функциональных задач. Поэтому изначально целесообразно выполнить абсолютную декомпозицию, а затем провести синтез структуры с учетом анализа ее оптимальности по указанным критериям.

Количество элементов структуры

$$k_e(i) = \sum_{j=1}^{k_{ef}} j n_{j,i}, \quad (1)$$

где i – номер варианта структуры; j – количество элементарных функций, интегрированных в одном элементе структуры, может принимать значения от 1 до общего количества элементарных функций ОП k_{ef} ; $n_{j,i}$ – количество элементов с интегрированием j элементарных функций i -го варианта.

В соответствии с (1) количество элементов структуры ОП проектирования может изменяться в пределах от 1 до k_{ef} (рис.1).

Количество связей $k_c(i)$ определяется количеством элементов и принципом действия ОП.

Наименьшее $k_c(i)$ будут иметь линейные и радиальные структуры ОП, для которых

$$k_{c,line}(i) = \min k_c(i) = k_e(i) - 1.$$

При условии выполнения каждым элементом одной элементарной функции (рис.1)

$$k_{c,line} = k_{ef} - 1.$$

Максимальное $k_c(i)$ соответствует случаю, когда все элементы структуры взаимосвязаны друг с другом, а каждый элемент выполняет только одну элементарную функцию (рис.1), тогда

$$\max k_c = C_{k_{ef}}^2 = \frac{k_{ef}!}{2!(k_{ef}-2)!} = \frac{k_{ef}(k_{ef}-1)}{2}.$$

В соответствии с графиками (рис.1) разница между максимальным и минимальным количеством связей элементов структуры ОП резко увеличивается при росте количества элементов. Что порождает огромное поле для теоретически

возможных вариантов структуры ОП. Для одноэлементного ОП существует один вариант, для двухэлементного – 5 вариантов, для трехэлементного – 29 вариантов и так далее. Для четырехэлементного ОП количество возможных структур измеряется сотнями, что говорит о геометрической прогрессии роста числа вариантов структуры. Поэтому структурный синтез сложных многофункциональных ОП является громоздким процессом, требующим обработки больших массивов данных.

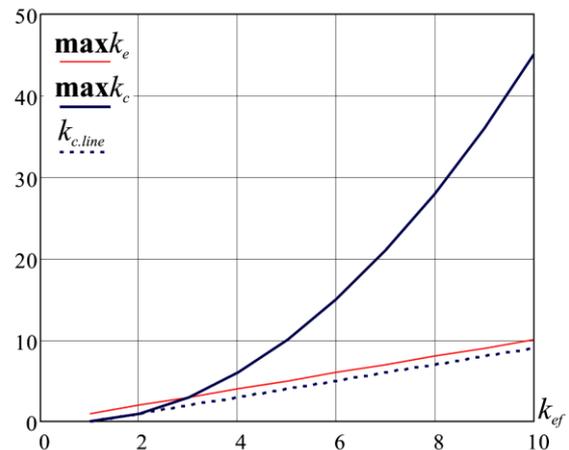


Рис. 1. Залежності кількості елементів і зв'язей від кількості елементарних функцій ОП

Как видно, количество связей напрямую зависит от количества элементов. На основании чего можно сформулировать **теорему оптимума связей**: *минимум связей имеет место при минимуме элементов ОП.*

Доказательство теоремы оптимума связей вытекает из следующего: предположим, что ОП имеет N_1 элементов и C_1 связей. Затем интегрируются два элемента в один более сложный, что соответствует уменьшению количества элементов до

$$N_2 = N_1 - 1.$$

При этом количество связей уменьшится как минимум на 1, т. к. устраняется связь между двумя объединенными элементами, следовательно

$$C_2 \leq C_1 - 1.$$

Таким образом, уменьшение элементов до минимума ведет к уменьшению связей до минимума.

Исходя из теоремы минимума связей, комплексный критерий оптимизации можно заменить частным – минимума элементов ОП, тогда оптимальная структура

$$S(i_{\text{опт}}) \Rightarrow \min k_e(i) = \min \sum_{j=1}^{k_{ef}} j n_{j,i}. \quad (2)$$

Таким образом, можно сформулировать **теорему оптимума структуры**: *оптимальным является вариант структуры ОП с минимальным количеством элементов.*

В обобщенном виде алгоритм формирования оптимальной структуры представлен на рис. 2. Первоначально выполняется процедура полной декомпозиции, в процессе которой выполняется обращение в «Архив», представляющий собой, в том числе, базу данных всех известных элементов с описанием их функциональных возможностей. Также в нем хранится информация о структурных реализациях различных ОП, ее использование способно предотвратить повторный синтез аналогичных ОП.

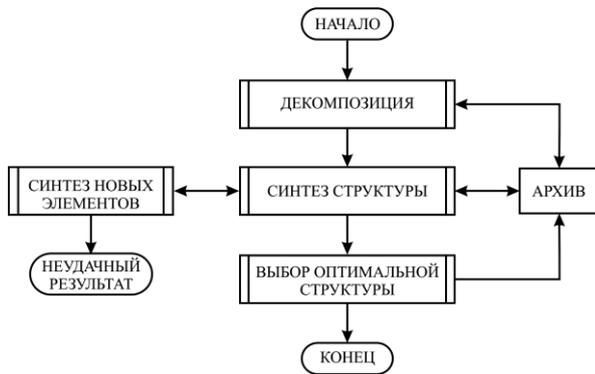


Рис. 2. Обобщенная блок-схема алгоритма синтеза оптимальной структуры

Далее осуществляется синтез структуры ОП, в процессе которого может потребоваться элемент с нереализованной ранее элементарной функцией, тогда требуется запускать процедуру синтеза новых элементов [8]. Данная процедура не может быть полностью реализована всегда в автоматическом режиме, наиболее подходящим будет интерактивный режим. Если такая реализация невозможна, имеет место неудачный синтез и окончание процедуры синтеза структуры ОП, тогда необходимо пересмотреть техническое задание.

При синтезе более одного варианта структуры ОП запускается процедура выбора оптимальной структуры в соответствии с критерием (2). При нескольких вариантах с одинаковым минимальным количеством элементов используется ограничение в виде минимума связей

$$S(i_{\text{опт}}) \rightarrow \min k_c(i).$$

Если все равно остаются несколько оптимальных вариантов, то следует использовать иные ограничения (технологические, результаты параметрического синтеза и т. д.).

Примером применения рассмотренного алгоритма является синтез электроприводов повы-

шенной безотказности [13].

Выводы

1. Определяющим критерием СО является количество элементов, а критерий количества связей вырождается и не влияет на конечный результат СО, поэтому оптимальной является структура ОП, имеющая минимум количества элементов.

2. Оптимальную структуру необходимо искать не путем выполнения структурной оптимизации, а изначально формировать ее с помощью предложенного алгоритма.

Список использованной литературы

- Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. Для вузов [Текст] / И. П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с.
- Горюнов, А. Метод структурного и параметрического синтеза и анализа энергоустановок [Текст] / А. Горюнов, Р. Р. Ямалиев, Д. А. Ахмедзянов // Молодой ученый. – 2011. – № 2. Т.1. – С. 16–19.
- Ставинский, Р. А. Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств [Текст] / Р. А. Ставинский // Вісник КДУ. – Кременчук: КДУ. – 2010. – №. 4 (63). – Ч. 2. – С. 91–94.
- Бальян, Р. Х. Аналитический метод геометрической оптимизации ферромагнитных устройств [Текст] / Р. Х. Бальян, В. П. Обрусник // Электричество. – 1979. – № 9. – С. 40–46.
- Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM /CAE) [Текст] / Кунву Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
- Батищев, Д. И. Методы оптимального проектирования: учеб. пособие для вузов [Текст] / Д. И. Батищев. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
- Андронов, С. А. Методы оптимального проектирования [Текст] / С. А. Андронов. – СПб.: СПбГУАП, 2001. – 169 с.
- Кімстач, О. Ю. Интегративний метод проектування об'єктів електромеханіки [Текст] / О. Ю. Кімстач // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції: – Миколаїв: НУК, 2010. – С. 392–394.
- Mehmet ÇUNKAŞ. A Review on Optimization of Electrical Machines Using Evolutionary Algorithms [Text] / ÇUNKAŞ Mehmet // Journal of Selcuk University Natural and Applied Science. Vol 4, No 1. 2015. – pp. 73–96.
- Satyajit Samaddar. Using Genetic Algorithm Minimizing Length of Air-Gap and Losses along with Maximizing Efficiency for Optimization of

Three Phase Induction Motor [Text] / Satyajit Samaddar, Surojit Sarkar, Subhro Paul, Sujay Sarkar, Gautam Kumar Panda, Pradip Kumar Saha // International Journal of Computational Engineering Research (IJCER) Volume 3, Issue 5, May, 2013. pp. 60–66.

11. Плюгин, В. Е. Анализ алгоритмов оптимизации электрических машин [Электронный ресурс] / В. Е. Плюгин, Л. В. Шилкова // Международная научная конференция MicroCAD. НТУ «ХПИ», 2015. – Режим доступа: http://www.kpi.kharkov.ua/archive/MicroCAD/2015/S9/2015_5_Tezisy_sbornik_part2_2015_113.pdf.

12. Лопухина, Е. М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности: учеб. пособие [Текст]: учеб. пособие / Е. М. Лопухина, Г. А. Семенчуков. – М. : Высш. школа, 2002. – 511 с. – ISBN 5-06-004042-9.

13. Кімстач, О. Ю. Підвищення безвідмовності роботи машин змінного струму [Текст] / О. Ю. Кімстач // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2010. – № 2 (431). – С. 93–97.

References

1. Norenkov, I. P. (2002). Basis of automated design [Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya]. 2th ed, Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 336 p.

2. Goryunov, A., Yamaliev, R. R. and Ahmedzyanov, D. A. (2011). The method of structure and parameter synthesis and analyze of power plant [Metod strukturnogo i parametricheskogo sinteza i analiza energostanovok]. Molodoy uchenyy, Vol. № 2. T.1., pp. 16–19.

3. Stavinsky, R. A. (2010). Nontraditional technical decisions, formulation of the problem and structural optimization method of induction static devices [Netraditcionnye tehnicheckie resheniya, postanovka zadachi i metod strukturnoy optimizacii indukcionnyh staticheskikh ustroystv]. Visnik KDU, Vol. №. 4(63). – Т. 2., pp. 91–94.

4. Bal'yan, R. H. and Obrusnik, V. P. (1979). Analytic method of geometric optimization of ferromagnetic devices [Analiticheskiy metod geometricheskoy optimizacii ferromagnitnyh ustroystv]. Elektrichestvo, Vol. № 9, pp. 40–46.

5. Li, K. (2004). Basis of CAD (CAD/CAM/

CAE) [Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE)]. Saint Petersburg: Piter Publ., 560 p.

6. Batischev, D. I. (1984). Methods of optimal design [Metody optimal'nogo proektirovaniya]. Moscow: Radio I svyaz' Publ., 248 p.

7. Andronov, S. A. (2001). Methods of optimal design [Metody optimal'nogo proektirovaniya]. Saint Petersburg: SPbGUAP, 169 p.

8. Kimstach, O. Yu. (2010). Integrative method of electromechanics objects design [Integrativnyy metod proektuvannya obektiv elektromehaniki]. In: Innovacii v sudnobuduvanni ta okeanotehnitci. Mykolaiv: NUK pp. 392–394.

9. Mehmet, ÇUNKAŞ. (2015). A Review on Optimization of Electrical Machines Using Evolutionary Algorithms. Journal of Selcuk University Natural and Applied Science, Vol. 4, No1. pp. 73–96.

10. Satyajit Samaddar, Surojit Sarkar, Subhro Paul, Sujay Sarkar, Gautam Kumar Panda and Pradip Kumar Saha. (2013). Using Genetic Algorithm Minimizing Length of Air-Gap and Losses along with Maximizing Efficiency for Optimization of Three Phase Induction Motor. International Journal of Computational Engineering Research (IJCER), Volume 3, Issue 5, May, pp. 60–66.

11. Plugina, V. E. and Shilkova, L. V. (2015). Analyze of algorithms of electrical machines optimization [Analiz algoritmov optimizacii elektricheskikh mashin]. In: Mejdunarodnaya nauchnaya konferenciya MicroCAD. [online] Kharkov: NTU "HPI", pp. 113. Available at: http://www.kpi.kharkov.ua/archive/MicroCAD/2015/S9/2015_5_Tezisy_sbornik_part2_2015_113.pdf [Accessed 20 oct. 2016].

12. Lopuhina, E. M. and Semenchukov, G. A. (2002). Automatized design of low power electrical machines [Avtomatizirovannoe proektirovanie elektricheskikh mashin maloy moschnosti]. Moscow: Vysshaya shkola, 511 p.

13. Kimstach, O. Yu. (2010). Increasing of operation infallibility of alternative current electrical machines [Pidvyschennya bezvidmovnosti roboty mashin zminnogo strumu]. Zbirnyk naukovykh prac' NUK, Vol. № 2 (431), pp. 93–97.

STRUCTURAL OPTIMIZATION IN SOME TASKS OF ELECTROMECHANICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

O. Yu. Kimstach

Admiral Makarov National University of shipbuilding

Abstract. *The subjects of research are algorithms and methodological bases for performing structural optimization in electromechanics and electrical engineering. Research is made to provide improving the automation level of optimal structure receipt of electromechanics and electrical engineering objects. The purpose of the work – the formation of the methodological fundamentals for design of optimal structures of electromechanics and electrical engineering objects. The paper presents the identified deficiencies existing methods and ways of optimal structures obtaining. The problem of independent variables identification for the objective function of structural optimization is solved. Research is based on the functional analysis of complex optimization criterion of the structure, which has partial criteria of elements and connections numbers. Number of structure variant is taken as the independent variable, which is later replaced by the number of elementary functions. It is noted that the amount of structure variant significantly enhances with increasing elementary functions. Functional dependences for a number of elements and connections are formulated, for which by the example of linear structures functional analysis is made. Based on the analysis the theorems of connections and structures optima are formulated. Theorem of connections optimum: connections minimum takes place with a minimum of elements. Theorem of structure optimum: structure variant is optimal with a minimum of elements number. A generalized algorithm for the synthesis of the optimal structure of electromechanics and electrical engineering objects is proposed, which can be used in the design of electrical machines, electrical drives and electrical systems. The generalized algorithm synthesis of optimal structure and its methodological foundations are the novelty of the work. Conclusions: 1. The determinative criterion for structural optimization is the number of elements. 2. The optimal structure must be sought not by execution of structural optimization; it has to form initially with the help of the proposed algorithm.*

Keywords: *structural synthesis, optimization, design procedure, the theorem of connections optimum, the theorem of structure optimum, generalized algorithm, objects of electromechanics and electrical engineering.*

СТРУКТУРНА ОПТИМІЗАЦІЯ В ОКРЕМИХ ЗАДАЧАХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

О. Ю. Кімстач

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Анотація. *Проаналізовані проблемні моменти структурної оптимізації в електромеханіці й електротехніці. Запропоновані підходи до формалізації завдання синтезу оптимальної структури об'єктів проектування. Проаналізовані залежності параметрів структури від складності функціональних завдань. Сформульовані теореми оптимумів зв'язків і структури. Запропонований узагальнений алгоритм синтезу оптимальної структури об'єктів електромеханіки й електротехніки.*

Ключові слова: *структурний синтез, оптимізація, проектна процедура, теорема оптимуму зв'язків, теорема оптимуму структури, узагальнений алгоритм, об'єкти електромеханіки та електротехніки.*

Получено 22.10.16



Кімстач Олег Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Судових електроенергетических систем Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова. Проспект Героев Сталинграда, 9, Николаев, Украина, 54025, e-mail: oleg.kimstach@nuos.edu.ua, тел. +38-05-05-52-52-39.

Oleg Kimstach, Candidate of technical sciences (PhD.), docent, docent of the Vessel electrical power systems department, Admiral Makarov National University of shipbuilding, Geroev Stalingrada Ave., 9, Nikolaev, Ukraine, 54025.

ORCID ID: 0000-0002-1447-8852