УДК 519.853 + 621.31

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА УКЛАДКИ КАБЕЛЯ В ОБМОТКЕ РЕАКТОРА

THE MATHEMATICAL MODEL OF A SCHEME FOR CABLE LAYING ROUTE IN A REACTOR WINDING

Антонов Алексей Сергеевич, магистрант каф. «Прикладная математика», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: Antonov.Alexey@urfu.ru
Глушков Даниил Александрович, вед. инж. каф. «Техника высоких напряжений», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: D.A.Glushkov@urfu.ru
Сесекин Александр Николаевич, д-р. ф.-м. наук, профессор каф. «Прикладная математика», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.n.sesekin@urfu.ru

Alexey S. Antonov, Master student, Department «Applied mathematics», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: Antonov.Alexey@urfu.ru
Daniil A. Glushkov, lead eng., Department «High voltage technique», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: D.A.Glushkov@urfu.ru
Alexander N. Sesekin, Doctor Sc., Prof., Department «Applied mathematics», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.n.sesekin@urfu.ru

Аннотация: В настоящей статье предлагается способ для построения маршрута прокладки провода в реакторе последовательного включения, используемого для нужд электроэнергетики. Рассматривается математическая модель, описывающая возможный вариант укладки провода. Предложенная модель задачи укладывается в стандартную задачу о рюкзаке. Результаты расчета рассмотрены на модельном примере.
Abstract: This paper describes a method for creating a route for laying wires in a series reactor used for the needs of the electric power industry. A mathematical model describing possible variant of laying a wire is considered. The proposed model of the problem fits into the standard problem of a knapsack. The calculation results on a model example are considered.

Ключевые слова: токоограничивающий реактор; схема намотки; транспозиция проводов; задача о ранце.
Key words: current-limiting reactor; winding scheme; conductor transposition; knapsack problem.

ВВЕДЕНИЕ

Надежная защита от бросков аварийных токов в энергосистеме обеспечивается, преимущественно, установкой токограничивающих реакторов (ТОР). В процессе работы таких устройств часто возникает избыточный нагрев, обусловленный, главным образом, неравномерным токораспределением между параллельными ветвями в обмотке [1]. Данное обстоятельство в большинстве случаев приводит к выходу из строя реактора. Решения по повышению класса нагревостойкости изоляции кабеля позволяют повысить срок службы ТОР [2]. Тем не менее, к реактору, неравномерно обтекаемому током, предъявляются повышенные требования по электродинамической стойкости. Более того, у неравномерно нагруженного реактора технические потери электроэнергии больше. Отдельного внимания при конструировании ТОР заслуживает технологичность укладки обмотки и общее количество закладываемых материалов (главным образом, кабель и планки). Поэтому разработка ТОР под те или иные параметры требует комплексного подхода [3,4]. Обеспечение равномерного токораспределения, экономичности и технологичности конструкции достигается выбором соответствующей схемы транспозиции проводов (СТП). Выбор соответствующей СТП является одним из этапов создания аналитической обмотки [1].

В данной работе рассматривается математическая модель построения алгоритма СТП. Предложенная математическая модель укладывается в существующую модифицированную задачу о рюкзаке.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДЛЯ УКЛАДКИ ВЕТВИ

Исходим из того, что таблица со значениями эквивалентных индуктивностей витков уже получена [5].

Для обмотки, содержащей k-ветвей, положение витка, находящегося в i-ом горизонтальном и j-ом вертикальном ряду справедливо выражение:

$$x_{ij}^{k} = \{0,1\} \text{ для } \forall k = \overline{1,p}, \qquad (3)$$

где p – количество ветвей. Единица указывает на наличие витка k-ой ветви в пазу с номером i,j, ноль – на отсутствие.

Условие полного заполнения горизонтального ряда:

$$\sum_{k=1}^{p}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}^{k} = n \text{ при } i = \text{fixed};\ j = \overline{1,n}; k = \overline{1,p}, \quad (4)$$

где n – количество пазов в планке.
Условие нахождения каждой ветви в каждом горизонтальном ряду хотя бы 1 раз:

$$(n - p + 1) \geq \sum_{j=1}^{n} x_{ij}^{k} \geq 1. \qquad (5)$$

Левая часть данного неравенства указывает максимально возможное заполнение ряда одной ветвью.

Условие полного заполнения вертикального ряда:

$$\sum_{k=1}^{p}\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^{k} = m \text{ при } j = \text{fixed}; i = \overline{1,m}; k = \overline{1,p}. \quad (6)$$

Переход витка в следующий ряд из произвольного положения за исключением крайнего, задается формулой:

$$x_{ij}^{k} \to x_{(i+1),(j\pm1,0)}^{k} \text{ при}$$
$$k = \text{fixed}; i = \overline{1,m-1}; j = \overline{2,n-1}. \qquad (7)$$

Переход витка из крайнего левого положения:

$$x_{ij}^{k} \to x_{(i+1),(j+1,0)}^{k} \text{ при}$$
$$k = \text{fixed}; i = \overline{1,m-1}; j = \overline{1,n-1}. \qquad (8)$$

Переход витка из крайнего правого положения:

$$x_{ij}^{k} \to x_{(i+1),(j-1,0)}^{k} \text{ при}$$
$$k = \text{fixed}; i = \overline{1,m-1}; j = \overline{2,n}. \qquad (9)$$

Возможно только однонаправленное движение между горизонтальными рядами. При этом не допускается пропускание ряда.

Движение витка внутри ряда из произвольного положения за исключением крайнего, задается формулой:

$$x_{ij}^{k} \to x_{i,(j+1,j-1)}^{k} \text{ при}$$
$$k = \text{fixed}; i = \overline{1,m}; j = \overline{2,n-1}. \qquad (10)$$

Переход витка из крайнего левого положения:

$$x_{ij}^{k} \to x_{i,(j+1)}^{k} \text{ при}$$
$$k = \text{fixed}; i = \overline{1,m}; j = \overline{1,n-1}. \qquad (11)$$

Переход витка из крайнего правого положения:

$$x_{ij}^{k} \to x_{i,(j-1)}^{k} \text{ при}$$
$$k = \text{fixed}; i = \overline{1,m}; j = \overline{2,n}. \qquad (12)$$

В горизонтальном ряду возможно только однонаправленное движение ветви.

В первом приближении рассматривается целевая функция в отношении индуктивностей ветвей следующего вида:

$$z = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij} \cdot x_{ij}^{k} \to const \text{ для } \forall k = \overline{1,p}, \quad (13)$$

где c_{ij} - эквивалентная индуктивность витка.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИИ ВЕТВИ

Рассматриваемая катушка состоит из 48 витков, количество ветвей – 3. Расчет выполняется методом обобщенного приведенного градиента. Эквивалентные индуктивности витков и совокупность нулей и единиц, полученных в результате первой итерации, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Построение траектории 1-ой ветви в катушке после 1-ой итерации

Наличие витка	0	0	0	1	0	0
Индуктивность витка [Гн]	9,5	12,5	15,1	17,2	18,5	18,6
Наличие витка	0	0	1	1	0	0
Индуктивность витка [Гн]	11	14,6	17,6	20	21,3	21,3
Наличие витка	0	0	1	1	1	0
Индуктивность витка [Гн]	11,9	15,8	19,1	21,7	23,5	22,9
Наличие витка	0	0	0	0	1	1
Индуктивность витка [Гн]	12,4	16,4	19,8	22,4	23,8	23,6
Наличие витка	0	0	0	1	1	0
Индуктивность витка [Гн]	12,4	16,4	19,8	22,4	23,8	23,6
Наличие витка	0	0	1	0	0	0
Индуктивность витка [Гн]	11,9	15,8	19,1	21,7	23,5	22,9
Наличие витка	0	0	0	1	0	0
Индуктивность витка [Гн]	11	14,6	17,6	20	21,3	21,3
Наличие витка	0	0	1	1	0	0
Индуктивность витка [Гн]	9,5	12,5	15,1	17,2	18,5	18,6

Значения индуктивностей верхней и нижней половин катушки совпадают. Единицы указывают на наличие или отсутствие витка в пазу. Набранная индуктивность полученной ветви составляет 284,1 Гн. Отклонение полученного значения от эталонного (287 Гн) составило около 1%.

После построения 1-ой ветви, на ненулевые элементы накладывается строгое ограничение равенства нулю и выполняется построение следующей ветви. Если решение для 1-ой ветви не позволяет выполнить построение остальных ветвей с учетом накладываемых ограничений, то изменяется начальное приближение. Данная процедура выполняется итерационно до нахождения конечного решения.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе реализована математическая модель для построения траектории обмотки в ТОР на основании значений индуктивностей витков катушки. Данный алгоритм в контурном виде отражает идеологию конструирования обмотки, обеспечивающую максимально равномерное токораспределение по параллельным ветвям, что объясняется одинаковыми с определенной степенью точности эквивалентными индуктивностями ветвей. Такой алгоритм дает прирост экономичности, поскольку накладывает ограничение на минимизацию длины перехода между горизонтальными рядами (смещение не более чем на один элемент вдоль диаметра).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стернин В. Г. Сухие токоограничивающие реакторы / В. Г. Стернин, А. К. Карпенский. – Москва ; Ленинград : Энергия, 1965. – 256 с.

2. Провод реакторный : пат. № 169339 Рос. Федерация : МПК H 01 B 7/295 (2006.01) / патентообладатель ООО Кабель Технологии Инновации. – № 2016142391 ; заявл. 27.10.2016 ; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 8.

3. Antonov A.S. Analytical Approach in Winding Design in Current-Limiting Reactors [Electronic resourse] / A.S. Antonov, D.A. Glushkov, A.N. Sesekin // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2017. P. 1477–1482.

4. Antonov A. S. Research on electromagnetic and heat processes in dry type air core current-limiting reactors [Electronic resourse] / A.S. Antonov, D.A. Glushkov // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2017. P. 1471–1476.

5. Стернин В. Г. Вопросы токораспределения в катушках сильного тока / В. Г. Стернин // Электричество. – 1963. – № 2. – С. 31–34.