

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 621.31, 621.313.33

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-36-45

Карандей Владимир Юрьевич*, Попов Борис Клавдиевич, Попова Ольга Борисовна, Афанасьев Виктор Леонидович

Кубанский государственный технологический университет

*E-mail: epp_kv@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ



Информация о статье

Поступила:

25 мая 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 октября 2022 г.

Принята к печати:

04 октября 2022 г.

Ключевые слова:

специальный электрический привод, управляемый асинхронный каскадный электрический привод, методы оптимизации, оптимизация параметров, преобразование энергии, математическое моделирование, электромагнитное поле, электромагнитная система.

Аннотация.

В статье приведена оценка методов оптимизации для исследования оптимальной геометрии и характеристик специальных электрических приводов. Показаны контрольные примеры решенных задач с помощью некоторых методов оптимизации. Для решения поставленных задач оптимальным считается метод геометрического программирования, являющийся частным случаем нелинейного программирования. Выполнена оценка двойственной функции для любого выбора оптимизации объекта. Приведено решение общей задачи математического программирования. Приведена оценка применения оптимального планирования для исследования специальных электрических приводов. Приведено решение по условиям ортогональности, которые должны удовлетворять условию нормализации. Показано применение позиномов для определения оптимальных значений параметров специальных электрических приводов. Применение метода геометрического программирования для решения задачи минимизации позиномов позволяет определить оптимальные значения параметров специальных электрических приводов. Показано применение геометрических неравенств при решении задачи оптимизации специальных электрических приводов. Геометрические неравенства для решения задачи оптимизации используются для нахождения оценок снизу для позиномов. Рассмотрены задачи применения приближенного определения минимума. Исследование этих задач при помощи геометрического программирования показывает, какие преимущества дает использование двойственной программы для решения задачи оптимизации.

Для цитирования: Карандей В.Ю., Попов Б.К., Попова О.Б., Афанасьев В.Л. Применение метода геометрического программирования для исследования оптимальных параметров специальных электрических приводов // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 5 (163). С. 36-45. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-36-45

Введение

На современном этапе развития промышленности возникает потребность в частой смене конструкций производственных механизмов [1-2]. Для правильного проектирования таких устройств необходимо применение нетрадиционных технических решений [3-4]. Проектированию специальных электрических приводов предшествуют обширные

поисковые исследования. Сюда следует отнести аналитический обзор литературных источников и патентов. Немаловажное значение играет анализ существующих математических моделей, а также методов решения подобных задач [5-6].

При создании специальных электрических приводов необходимо исследование динамики изменения электромагнитных параметров [7-8] управляе-

мых специальных электрических приводов [9]. Это является довольно трудной задачей. Для решения такой задачи необходимо правильно определять параметры электромагнитных процессов [10-11], таких как электромагнитный поток, напряженность электромагнитного поля, магнитную индукцию [12-13]. Правильное определение этих параметров позволит рассчитать параметры мощности и электромагнитного момента [14-15] на валу специальных электрических приводов. Полученный результат вычислений зависит от типа электрического привода [16-17], точности математических моделей [18-19], системы управления [20-21], правильности проектирования [22-23]. Это позволит создавать новые эффективные системы электроприводов [24-25] с улучшенными характеристиками [26-27]. Применение систем автоматизации позволяет стабилизировать параметры исследуемых электроприводов [28-29].

Наиболее важный шаг при проектировании специальных электрических приводов – это оптимизация. Определение наиболее подходящего метода оптимизации является достаточно сложной задачей при проектировании новых устройств. Здесь требуется практический опыт и хорошая математическая подготовка. В результате у конструктора может не оказаться нужного опыта и математических знаний. Для решения этой проблемы необходимо создавать новые алгоритмы [30-31] для создания специальных информационных помощников [32-33]. Был разработан программный продукт ОПТИМЭЛЬ, позволяющий выбирать наиболее подходящий метод оптимизации для решаемой задачи исследования. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: выбор метода оптимизации посредством системы вопросов и ответов, реализованной через указатели; предоставление перечня литературы по введенному запросу. Для подтверждения правильности выбора рассмотрим систему решенных задач применительно к специальным электрическим приводам различными оптимизационными методами.

Рассмотрим оценку двойственной функции для любого выбора оптимизации объекта. Приведено решение общей задачи математического программирования. Использование специфических особенностей создает возможности более эффективного исследования задачи оптимизации специальных электрических приводов. Ранее была решена задача минимизации при помощи неравенства, соответствующим образом приспособленного к рассматриваемой задаче. Чтобы показать, как построить соответствующее неравенство, мы начнем с общего геометрического неравенства

$$\delta_1 U_1 + \delta_2 U_2 + \dots + \delta_n U_n \geq U_1^{\delta_1} U_2^{\delta_2} \dots U_n^{\delta_n}, \quad (1)$$

где U_1, U_2, \dots, U_n – произвольные неотрицательные числа;

$\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ – произвольные положительные веса, удовлетворяющие условиям нормализации.

$$\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n = 1, \quad (2)$$

Доказательство этого неравенства будет дано позже. Нам удобно произвести замену переменных, полагая $u_1 = \delta_1 U_1, u_2 = \delta_2 U_2$ и т. д. Тогда неравенство (1) принимает вид

$$u_1 + u_2 + \dots + u_n \geq \left(\frac{u_1}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \left(\frac{u_2}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \dots \left(\frac{u_n}{\delta_n}\right)^{\delta_n}, \quad (3)$$

Это соотношение мы также будем считать геометрическим неравенством. Его левая часть является прямой функцией g . Правая часть будет называться преддвойственной функцией и обозначаться буквой V . Неравенство (3) можно переписать так:

$$g \geq V, \quad (4)$$

где g – прямая функция;

V – преддвойственная функция.

Преддвойственная функция V является функцией-произведением членов u_i , возведенных в степень. Таким образом, если исходная функция – позином, то мы можем подставить члены u_i , в правую часть (3) и получить преддвойственную функцию

$$V(\bar{\delta}, \bar{t}) = \left(\frac{c_1}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \left(\frac{c_2}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \dots \left(\frac{c_n}{\delta_n}\right)^{\delta_n} t_1^{D_1} t_2^{D_2} \dots t_m^{D_m}, \quad (5)$$

где D_j – линейные комбинации;

t_1, t_2, \dots, t_m – параметры технического проекта.

Показатели D_j являются линейными комбинациями показателей a_{ij} .

$$D_j = \sum_{i=1}^n \delta_i a_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

Допустим, что можно выбрать веса δ_j ; так, чтобы все показатели D_j обратились в нуль. Тогда преддвойственная функция $V(\bar{\delta}, \bar{t})$ не зависит от переменных t_j и мы назовем ее двойственной функцией

$$v(\bar{\delta}) = \left(\frac{c_1}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \left(\frac{c_2}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \dots \left(\frac{c_n}{\delta_n}\right)^{\delta_n}, \quad (7)$$

Из неравенства (8) следует, что g имеет положительную точную нижнюю грань M . Итак, мы можем записать, что

$$g(\bar{t}) \geq M \geq v(\bar{\delta}), \quad (8)$$

Из (8) видно, что M является оценкой сверху двойственной функции для любого выбора весов, при котором показатели D_j обращаются в нуль. В действительности M – точная верхняя грань v . Это свойство двойственной функции было рассмотрено применительно к конкретной оптимизационной задаче.

Рассмотрим оценку применения оптимального планирования для исследования специальных электрических приводов. Приведено решение по условиям условиями ортогональности, которые должны удовлетворять условию нормализации. Такой подход позволяет более эффективно исследовать задачи оптимизации специальных электрических приводов. Рассмотрим одну из таких задач – задачу оптимального планирования. Излагаемая ниже задача является примером задачи оптимального планирования, которая приводит к минимизации позинома.

Пусть требуется произвести 400 условных единиц массы магнитного материала. Допустим, что магнитного материала грузится в открытый ящик длиной t_1 , шириной t_2 и высотой t_3 . Боковые сторо-

ны и дно ящика изготовлены из материала, условная единица массы которого стоит 10 условных единиц, а передняя и задняя стенки из материала, условная единица массы которого стоит 20 условных единиц. После использования ящик не будет иметь остаточной стоимости, а каждая перевозка ящика туда и обратно стоит 0.1 условных единиц. Чему равна минимальная суммарная стоимость транспортировки 400 условных единиц массы магнитного материала?

Легко видеть, что суммарная стоимость g в условных единицах составляет

$$g = \frac{40}{t_1 t_2 t_3} + 40t_2 t_3 + 20t_1 t_3 + 10t_1 t_2, \quad (9)$$

Двойственная функция имеет вид

$$v = \left(\frac{40}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \left(\frac{40}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \left(\frac{20}{\delta_3}\right)^{\delta_3} \left(\frac{10}{\delta_4}\right)^{\delta_4}, \quad (10)$$

где веса удовлетворяют уравнениям

$$\begin{aligned} D_1 &= -\delta_1 + \delta_3 + \delta_4 = 0, \\ D_2 &= -\delta_1 + \delta_2 + \delta_4 = 0, \\ D_3 &= -\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Уравнения (11) называются условиями ортогональности. Веса также должны удовлетворять условию нормализации, которое в данном случае имеет вид

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 = 0 \quad (12)$$

Ясно, что четыре линейных уравнения, составляющие условия ортогональности и нормализации, имеют единственное решение

$$\delta'_1 = \frac{2}{5}, \quad \delta'_2 = \frac{1}{5}, \quad \delta'_3 = \frac{1}{5}, \quad \delta'_4 = \frac{1}{5}. \quad (13)$$

Подстановка этих значений в формулу (10) дает

$$v \left(\delta^{\delta'} \left(\frac{40}{2/5}\right)^{2/5} \left(\frac{40}{1/5}\right)^{1/5} \left(\frac{20}{1/5}\right)^{1/5} \left(\frac{10}{1/5}\right)^{1/5} \right) \quad (14)$$

Таким образом, минимальная суммарная стоимость равна 100 условных единиц.

Рассмотрим применение позиномов для определения оптимальных значений параметров специальных электрических приводов. Применение метода геометрического программирования для решения задачи минимизации позиномов позволяет определить оптимальные значения параметров специальных электрических приводов. Рассмотрим одну из таких задач – задачу оптимального планирования. Излагаемая ниже задача является примером задачи оптимального планирования, которая приводит к минимизации позинома.

В техническом проекте общие затраты g представляют собой сумму затрат на компоненты u_i ; так,

$$g = u_1 + u_2 + \dots + u_n. \quad (15)$$

Часто затраты на компоненты могут быть выражены через степенную функцию

$$u_i = c_i t_1^{a_{i1}} t_2^{a_{i2}} \dots t_m^{a_{im}}. \quad (16)$$

где c_i – положительная постоянная;

a_{ij} – произвольные вещественные числа.

Параметры проекта t_1, t_2, \dots, t_m считаются положительными переменными. При этих ограничениях функция g будет называться позиномом. Во многих случаях законы природы прямо приводят к таким функциям. В других случаях эта функциональная зависимость дает хорошее соответствие с опытом в широком диапазоне параметров t_j .

Метод геометрического программирования особенно удобен для решения задачи минимизации позиномов. Характерной особенностью геометрического программирования является то, что в нем основную роль играют члены u_i , входящие в позиномы g . Обычно в задачах такого типа внимание концентрируется в первую очередь на определении независимых переменных t_j . В настоящем методе, напротив, все усилия направлены на определение минимальных затрат и относительного вклада различных членов в эти минимальные затраты. Только после этого ставится вопрос об определении оптимальных значений параметров t_j .

Рассмотрим оптимизацию специальных электрических приводов на основе геометрического среднего. Решение задачи позволяет получить соответствующее взвешенное геометрическое среднее. Такой подход позволяет решать задачи оптимизации специальных электрических приводов. Один из подходов для реализации задачи оптимального проектирования специальных электрических приводов – использование геометрического среднего. Для исследования задачи минимизации позинома используется неравенство, согласно которому арифметическое среднее не превосходит геометрического среднего. Для краткости мы назовем его геометрическим неравенством. Простейшим геометрическим неравенством является такое неравенство:

$$\frac{1}{2}U_1 + \frac{1}{2}U_2 \geq U_1^{1/2}U_2^{1/2}, \quad (17)$$

где U_1 и U_2 – неотрицательные числа.

Чтобы доказать это, заметим, что

$$(U_1 - U_2)^2 \geq 0 \quad (18)$$

или

$$U_1^2 - 2U_1U_2 + U_2^2 \geq 0, \quad (19)$$

откуда

$$U_1^2 + 2U_1U_2 + U_2^2 \geq 4U_1U_2. \quad (20)$$

Извлечение квадратного корня из последнего неравенства дает неравенство (17). Геометрическое неравенство становится равенством тогда и только тогда, когда $U_1 = U_2$. В качестве первого обобщения неравенства (17) рассмотрим арифметическое среднее четырех неотрицательных чисел U_1, U_2, U_3 и U_4 . Тогда из (17) следует, что

$$\frac{1}{4}U_1 + \frac{1}{4}U_2 + \frac{1}{4}U_3 + \frac{1}{4}U_4 \geq \left(\frac{U_1+U_2}{2}\right)^{1/2} \left(\frac{U_3+U_4}{2}\right)^{1/2}. \quad (21)$$

Применяя (17) еще два раза, получаем

$$\frac{1}{4}U_1 + \frac{1}{4}U_2 + \frac{1}{4}U_3 + \frac{1}{4}U_4 \geq U_1^{1/4}U_2^{1/4}U_3^{1/4}U_4^{1/4} \quad (22)$$

Это другой пример геометрического неравенства. Ясно, что неравенство является строгим неравенством, если $U_1 \neq U_2$. Из соображений симметрии следует, что является равенством тогда и только тогда, когда $U_1 = U_2 = U_3 = U_4$.

Приравнявая некоторые числа U_i , можно получить взвешенное среднее. Так, предположим, что $U_2 = U_3 = U_4$. Тогда неравенство можно переписать в виде

$$\frac{1}{4}U_1 + \frac{3}{4}U_2 \geq U_1^{1/4}U_2^{3/4} \quad (23)$$

Левая часть этого неравенства представляет собой взвешенное арифметическое среднее чисел U_1 и U_2 с весами $1/4$ и $3/4$. Правая часть дает соответствующее взвешенное геометрическое среднее.

Рассмотрим применение геометрических неравенств при решении задачи оптимизации специальных электрических приводов. Геометрические неравенства для решения задачи оптимизации используются для нахождения оценок снизу для позиномов. Это свойство позволяет решать оптимизационные задачи для специальных электрических приводов. Рассмотрим задачу оптимизации с применением геометрических неравенств.

Геометрическое неравенство может быть использовано для нахождения оценок снизу для позиномов. Например, рассмотрим функцию $g(t)=4t+1/t$. Применение неравенства дает

$$g(t) \geq (8t)^{1/2} \left(\frac{2}{t}\right)^{1/2} = 4 \quad (24)$$

Таким образом, 4 является оценкой $g(t)$ снизу при положительных t . Заметим, однако, что $g(1/2)=4$, так что 4 в действительности является точной нижней гранью для $g(t)$.

В качестве второго примера рассмотрим функцию $g(t)=2t^3 + 6/t$. Применение неравенства для взвешенных средних дает

$$g(t) \geq \left(\frac{2t^3}{1/4}\right)^{1/4} \left(\frac{6}{3t/4}\right)^{3/4} = 8 \quad (25)$$

Таким образом, 8 является оценкой $g(t)$ снизу для положительных t . Однако $g(1) = 8$, так что 8 фактически есть точная нижняя грань $g(t)$. Теперь рассмотрим позином с двумя переменными t_1 и t_2 .

$$g(\bar{t}) = 4t_1 + \frac{t_1}{t_2^2} + \frac{4t_2^2}{t_1} \quad (26)$$

Чтобы найти оценку снизу для $g(t)$, используем следующее геометрическое неравенство

$$\frac{1}{4}U_1 + \frac{1}{4}U_2 + \frac{2}{4}U_3 \geq U_1^{1/4}U_2^{1/4}U_3^{2/4} \quad (27)$$

Тогда

$$g(\bar{t}) \geq \left(\frac{4t_1}{1/4}\right)^{1/4} \left(\frac{t_1}{t_2^2/4}\right)^{1/4} \left(\frac{4t_2^2}{2t_1/4}\right)^{2/4} = 8 \quad (28)$$

Таким образом, 8 является оценкой снизу для $g(t)$ при положительных t_1 и t_2 . Более того, 8 является точной нижней гранью для $g(t)$, так как $g(1/2, 1/2)=8$.

Рассмотрим задачу применения приближенного определения минимума. Исследование этих задач при помощи геометрического программирования показывает, какие преимущества дает использова-

ние двойственной программы для решения задачи оптимизации. Это свойство используется для решения задачи оптимизации специальных электрических приводов.

При рассмотрении задачи 1 условия ортогональности и нормализации приводят к четырем линейным уравнениям с четырьмя неизвестными и единственным решением. Таким образом, минимальная суммарная величина определяется сразу. Задача становится более сложной, если число линейных уравнений меньше, чем число неизвестных. Такой случай имеет место в следующем примере.

Задача 2. Эта задача такая же, как и задача 1, за исключением того, что условия требуют, чтобы $t_3 = 1$. Мы видим, что теперь суммарная величина равна

$$g = \frac{40}{t_1 t_2} + 40t_2 + 20t_1 + 10t_1 t_2 \quad (29)$$

Двойственная функция опять совпадает и условия ортогональности совпадают с (29), но уравнение для D_3 отсутствует. Теперь задача заключается в максимизации двойственной функции, подчиненной ограничениям, налагаемым тремя линейными уравнениями, которые определяются условиями ортогональности и нормализации.

Приближенное решение задачи 2 можно получить. Во-первых, заметим, что из того, что веса удовлетворяют условиям ортогональности и нормализации задачи 1, следует, что они удовлетворяют также менее ограничительным условиям задачи 2. С другой стороны, двойственные функции для задачи 1 и задачи 2 совпадают. Следовательно, минимальная искомая величина не может быть меньше определенного значения.

Чтобы получить верхнюю границу искомой величины, подставим в прямую функцию g пробные значения переменных. Положим $t_1 = 1$ и $t_2 = 1$. Тогда следует, что минимальная величина не может превосходить другого близкого значения. Теперь мы имеем верхнюю и нижнюю оценки минимальной стоимости. Если мы примем M равным среднему, то ошибка не может превосходить 5%.

Исследование этих двух задач при помощи геометрического программирования показывает, какие преимущества дает использование двойственной программы. Действительно, задача 1 при этом решается сразу. Задача 2 оказалась более трудной, но приближенное решение было получено довольно просто.

На основе проведенного анализа с использованием разработанного программного продукта ОП-ТИМЭЛЬ был определен метод оптимизации для рассматриваемых специальных электрических приводов. Этим методом является метод геометрического программирования, являющийся частным случаем нелинейного программирования. Найденное решение позволит проводить исследования оптимальной геометрии, параметров [34-35] и характеристик [36-37] специальных электрических приводов с применением методов оптимизации.

Заключение

В статье был проведен анализ методов оптимизации. Был произведен выбор наиболее подходяще-

го метода оптимизации для исследования оптимальной геометрии и характеристик специальных электрических приводов. На основе проведенного анализа с использованием разработанного программного продукта ОПТИМЭЛЬ был выбран метод геометрического программирования. Метод геометрического программирования является частным случаем нелинейного программирования. Найденное решение позволит проводить исследования оптимальной геометрии, параметров и характеристик специальных электрических приводов конструкций и различных производственных механизмов.

Благодарность

Отчетное исследование финансировалось РФФИ [Название проекта: Разработка теории оценки качества информации с учетом ее структурной составляющей, № 19-47-230004, от 19.04.2019] и администрацией Краснодарского края. Вся работа по составлению статьи и получению расчетных и экспериментальных данных была равномерно распределена среди ее авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malafeev S. I., Zakharov A. V., Safronenkov Y. A. A new series of asynchronous frequency-controlled motors for mining excavators. // Russian Electrical Engineering. 2019. Vol. 90. № 4. Pp. 299-303. DOI: 10.3103/S1068371219040060.
2. Козярук А. Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов. // Электротехника. 2019. № 3. С. 33-37.
3. Samoseiko V. F., Saushev A. V., Belousova N. V. Asynchronous motor control algorithm with parameter identification. Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon. 2019. Pp. 284-289. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877625.
4. Avdeev A., Osipov O. PMSM identification using genetic algorithm 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives, IWED 2019. Proceedings. 2019. 26. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664250.
5. Zakharov A., Kobelev A., Skitovich S., Makarov L. Research, development, manufacturing and application of energy efficient electric motors. 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018. Conference Proceedings. 2018. 10. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571692.
6. Bobrov E., Saushev A., Monahov A., Chertkov A. Development and analysis of diagnostic models of electrical machine windings. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. Pp. 439-447. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8-42.
7. Ким К. К., Иванов С. Н. Моделирование комбинированного электропривода. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 3. С. 44-50.
8. Климаш В. С., Соколовский М. А. Повышение эффективности комплекса электроприводов технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 575-581.
9. Данышина А. А. Методы и способы совершенствования электромеханических систем силокомпенсирующих манипуляторов. / Данышина А. А., Кравченко О. А., Бекин А. Б. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 1. С. 69-76.
10. Karandey V. Yu., Popov B. K., Afanasev V. L. Research of change of parameters of a magnetic flux of the stator and rotor of special electric drives. IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2018). 2018. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602911.
11. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B., Afanasyev V. L. Determination of electromagnetic parameters for improvement of efficiency of special electric drives. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. DOI:10.1088/1757-899X/560/1/012164.
12. Saushev A., Antonenko S., Lakhmenev A., Monahov A. Parametric identification of electric drives based on performance limits. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. Pp. 448-458. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8-43.
13. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B., Afanasyev V. L. Research of electromagnetic parameters for improvement of efficiency of special electric drives and components. 5th International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies. 2019. Pp. 69-74. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/PGSRET.2019.8882689.
14. Karandaev A. S., Gasiyarov V. R., Loginov B. M., Khramshin V. R. Force limiting at roll axial shifting of plate mill. Procedia Engineering. International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2017). 2017. Vol. 206. Pp. 1780-1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.
15. Blagodarov D. A., Safonov Y. M., Grigorian D. D., Khramshin V. R. Limiting dynamic loads of electric drive with flexible couplings and variable inertia moment. Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2018). 2018. Pp. 582-584. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317165.
16. Khrisanov V. I., Dmitriev B. F. The marine electrical power industry with the use of renewable energy carriers. Part 2. Axial multipole synchronous generators with permanent magnets for wind and wave offshore power plants Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87(10). Pp. 554-559.
17. Лот Н. С., Осипов О. И., Жидков А. М. Перспективы развития электроприводов шахтных подъемных установок. Приводы и компоненты машин. 2016. № 6(22). С. 9-12.
18. Сериков А. В., Суздорф В. И. Моделирование электромагнитных процессов в коллекторных электродвигателях с питанием от статических преобразователей. // Электротехника. 2016. № 12. С. 39-44.

19. Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Каминский А. В., Коваленко С. В. Методика определения параметров асинхронного двигателя. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 1. С. 30-36.
20. Дерюжкова Н. Е., Соловьев В. А., Тетерин В. В., Урасов Д. В. Сравнительная оценка классических и нечетких алгоритмов управления системой электропривода многоточечного формования изделий двойной кривизны // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 52-57.
21. Anuchin A., Aliamkin D., Lashkevich M., Zharkov A., Shpak D., Briz F. Current control of ac drives using shunt current sensors and delta-sigma modulation. Proceedings: IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2019. 44., Pp. 445-449. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/IECON.2018.8591705.
22. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B., Afanasyev V. L. Research of electrical power processes for optimum modeling and design of special electric drives. Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 157. Pp. 242-247. DOI: 10.2991/aime-18.2018.47.
23. Gasiyarov V. R., Khramshin V. R., Voronin S. S., Lisovskaya T. A., Gasiyarova O. A. Dynamic torque limitation principle in the main line of a mill stand: explanation and rationale for use. Machines. 2019. Vol. 7. № 4. Pp. 76. DOI: 10.3390/machines7040076.
24. Alekseev V. V., Emel'yanov A. P., Kozyaruk A. E. Analysis of the dynamic performance of a variable-frequency induction motor drive using various control structures and algorithms. Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87. № 4. Pp. 181-188. DOI: 10.3103/S1068371216040027.
25. Гуляев А. В., Фокин Д. С., Тен Е. Е., Малышева О. А. Определение влияния способов широтно-импульсной модуляции на потери мощности в асинхронном двигателе. Электротехника. 2018. № 9. С. 74-76.
26. Blagodarov D. A., Safonov Y. M., Grigorian D. D., Khramshin V. R. Limiting dynamic loads of electric drive with flexible couplings and variable inertia moment. Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus-2018. 2018. Pp. 582-584. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317165.
27. Kukishev D., Meshcheryakov V., Boikov A., Evseev A. Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive. X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). 2018. 3-6 Oct. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571784.
28. Власьевский С. В., Малышева О. А., Мельниченко О. В. Сравнение расчетных сил тяги по сцеплению электровозов переменного тока с асинхронным и коллекторным приводом. Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 5. С. 30-36.
29. Томасов В. С., Усольцев А. А., Вертегел Д. А., Денисов К. М. Исследование пульсаций электромагнитного момента в прецизионном сервоприводе при синусоидальной широтно-импульсной модуляции. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 359-368.
30. Popova O. B., Popov B. K., Karandey V. Yu., Shevtsov Yu. D., Klyuchko V. I. Theoretical propositions and practical implementation of the formalization of structured knowledge of the subject area for exploratory research. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 722. Pp. 432-437. DOI: 10.1007/978-3-319-73888-8-67.
31. Popova O., Shevtsov Yu., Popov B., Karandey V., Klyuchko V., Gerashchenko A. Entropy and algorithm of the decision tree for approximated natural intelligence. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 787. Pp. 310-321. DOI: 10.1007/978-3-319-94229-2_30.
32. Popova O. B., Popov B. K., Karandey V. Yu., Shevtsov Yu. D., Klyuchko V. I. Studying an element of the information search system: the choice process approximated to the natural intelligenc. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 869. Pp. 1150-1168. DOI: 10.1007/978-3-030-01054-6.
33. Попова О. Б., Попов Б. К. ОПТИМЭЛЬ. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2012615868 от 27 июня 2012 г.
34. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B., Afanasyev V. L. Optimization of parameters of special asynchronous electric drives. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. DOI:10.1088/1757-899X/327/5/052002.
35. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B., Afanasyev V. L. Determination of power and moment on shaft of special asynchronous electric drives, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. DOI:10.1088/1757-899X/327/5/052003.
36. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B., Afanasyev V. L. Research and analysis of force and moment of the cascade asynchronous electric drives. International conference on innovations and prospects of development of mining machinery and electrical engineering 2018 (IPDME 2018). IOP conference series: earth and environmental science. 2018. Vol. 194. № 5. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052009.
37. Karandey V. Yu., Popova O. B., Popov B. K., Afanasyev V. L. Research dynamics of change of electromagnetic parameters of controlled special electric drives. International Multi-Conference on Industrial Engineering

© 2022 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Карандей Владимир Юрьевич, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», (350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2), кандидат технических наук, доцент, epp_kvuy@mail.ru

Попов Борис Клавдиевич, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», (350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2), кандидат технических наук, доцент, pbk47@mail.ru

Попова Ольга Борисовна, доцент кафедры информационных систем и программирования, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», (350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2), кандидат технических наук, доцент, popova_ob@mail.ru

Афанасьев Виктор Леонидович, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», (350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2), старший преподаватель, buguvix@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Карандей В.Ю. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Попов Б.К. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Попова О.Б. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Афанасьев В.Л. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-36-45

Vladimir Yu. Karandey, Boris K. Popov, Olga B. Popova, Viktor L. Afanasiev

Kuban State Technological University

E-mail: epp_kvuy@mail.ru

APPLICATION OF THE GEOMETRIC PROGRAMMING METHOD TO STUDY THE OPTIMAL PARAMETERS OF SPECIAL ELECTRIC DRIVES

Abstract.

The article presents an evaluation of optimization methods for studying the optimal geometry and characteristics of special electric drives. Test examples of solved problems with the help of some optimization methods are shown. To solve the tasks set, we consider optimal the method of geometric programming, which is a special case of nonlinear programming. The dual function is estimated for any choice of object optimization. The solution of the general problem of mathematical programming is given. An assessment of the use of optimal planning for the study of special electric drives is given. A solution is given under the orthogonality conditions, which must satisfy the normalization condition. The use of posinomials for determining the optimal values of the parameters of special electric drives is shown. The application of the geometric programming method for solving the problem of minimizing posinomials makes it possible to determine the optimal values of the parameters of special electric drives. The application of geometric inequalities in solving the problem of optimizing special electric drives is shown. Geometric inequalities for solving the optimization problem are used to find lower bounds for posinomials. The problems of applying the approximate definition of the minimum are considered. The study of these problems using geometric programming shows the ad-



Article info

Received:

25 May 2022

Accepted for publication:

01 October 2022

Accepted:

04 October 2022

Keywords: special electric drive, controlled asynchronous cascade electric drive, optimization methods, parame-

ter optimization, energy conversion, mathematical modeling, electromagnetic field, electromagnetic system. advantages of using a dual program to solve an optimization problem.

For citation: Karandey V.Yu., Popov B.K., Popova O.B., Afanasiev V.L. Application of the geometric programming method to study the optimal parameters of special electric drives. *Mining Equipment and Electro-mechanics*, 2022; 5(163):36-45 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-36-45

REFERENCES

1. Malafeev S.I., Zakharov A.V., Safronenkov Y.A. A new series of asynchronous frequency-controlled motors for mining excavators. *Russian Electrical Engineering*. 2019; 90(4):299-303. DOI: 10.3103/S1068371219040060.
2. Kozyaruk A.E. Modern effective electric drives of production and transport mechanisms. *Electrotechnika*. 2019; 3:33-37.
3. Samoseiko V.F., Saushev A.V., Belousova N.V. Asynchronous motor control algorithm with parameter identification. Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering. UralCon. 2019. Pp. 284-289. Publisher: IEEE, doi: 10.1109/URALCON.2019.8877625.
4. Avdeev A. Osipov O. PMSM identification using genetic algorithm 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives, IWED 2019 - Proceedings. 2019. 26. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664250.
5. Zakharov A., Kobelev A., Skitovich S., L. Makarov, Research, development, manufacturing and application of energy efficient electric motors. 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 - Conference Proceedings. 2018. 10. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571692.
6. Bobrov E., Saushev A., Monahov A., Chertkov A. Development and analysis of diagnostic models of electrical machine windings. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 982:439-447. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8-42.
7. Kim K.K., Ivanov S.N. Modeling of the combined electric drive, News of higher educational institutions. *Electromechanics*. 2019; 62(3): 44-50.
8. Klimash V.S., Sokolovskii M.A. Increased efficiency of electric drive complex of process equipment of mining processing plant. *News of Tula State University. Technical sciences*. 2021; 2:575-581.
9. Danshina A.A. [et al.] Methods and methods of improving electromechanical systems of force-compensating manipulators. *Izvestia of higher educational institutions. Electromechanics*. 2021; 64(1):69-76.
10. Karandey V.Yu., Popov B.K., Afanasev V.L. Research of change of parameters of a magnetic flux of the stator and rotor of special electric drives. IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2018). 2018. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602911.
11. Karandey V.Yu., Popov B.K., Popova O.B., Afanasev V.L. Determination of electromagnetic parameters for improvement of efficiency of special electric drives. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019; 560. DOI:10.1088/1757-899X/560/1/012164.
12. Saushev A., Antonenko S., Lakhmenev A., Monahov A. Parametric identification of electric drives based on performance limits. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 982:448-458. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8-43.
13. Karandey V.Yu., Popov B.K., Popova O.B., Afanasev V.L. Research of electromagnetic parameters for improvement of efficiency of special electric drives and components. 5th International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies. 2019. Pp. 69-74. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/PGSRET.2019.8882689.
14. Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Khramshin V.R. Force limiting at roll axial shifting of plate mill. *Procedia Engineering. International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2017)*. 2017; 206:1780-1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.
15. Blagodarov D.A., Safonov Y.M., Grigorian D.D., Khramshin V.R. Limiting dynamic loads of electric drive with flexible couplings and variable inertia moment. Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2018). 2018. Pp. 582-584. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317165.
16. Khrisanov V.I., Dmitriev B.F. The marine electrical power industry with the use of renewable energy carriers. Part 2. *Axial multipole synchronous generators with permanent magnets for wind and wave offshore power plants Russian Electrical Engineering*. 2016; 87(10):554-559.
17. Lot N.S., Osipov O.I., Zhidkov A.M. Future prospects of winder electric drives. *Drives and components of machines*. 2016; 6(22):9-12.
18. Serikov A.V., Suzdorf V.I. Modeling of electromagnetic processes in collector motors powered by static converters. *Electrical engineering*. 2016; 12:39-44.
19. Kulinich Y.M., Shuharev S.A., Kaminsky A.V., Kovalenko S.V. Method for determining the parameters of an induction motor. *News of higher educational institutions. Electromechanics*. 2021; 64(1):30-36.
20. Deryuzhkova N.E., Solovyev V.A., Teterin V.V., Urasov D.V. Comparative evaluation of classic and fuzzy control algorithms for electric drive system of multi-point molding of products of double curvature. *Omsk Scientific Bulletin*. 2020; 2(170):52-57.

21. Anuchin A., Aliamkin D., Lashkevich M., Zharkov A., Shpak D., Briz F. Current control of ac drives using shunt current sensors and delta-sigma modulation. Proceedings: IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2019; 44:445-449. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/IECON.2018.8591705.

22. Karandey V.Yu., Popov B.K., Popova O.B., Afanasev V.L. Research of electrical power processes for optimum modeling and design of special electric drives. *Advances in Engineering Research*. 2018; 157:242-247. DOI: 10.2991/aime-18.2018.47.

23. Gasiyarov V.R., Khrumshin V.R., Voronin S.S., Lisovskaya T.A., Gasiyarova O.A. Dynamic torque limitation principle in the main line of a mill stand: explanation and rationale for use. *Machines*. 2019; 7(4):76. DOI: 10.3390/machines7040076.

24. Alekseev V.V., Emel'yanov A.P., Kozyaruk A.E. Analysis of the dynamic performance of a variable-frequency induction motor drive using various control structures and algorithms. *Russian Electrical Engineering*. 2016; 87(4):181-188. DOI: 10.3103/S1068371216040027.

25. Gulyaev A.V., Fokin D.S., Ten E.E., Malysheva O.A. Definition of influence of ways of pulse width modulation on power losses in the asynchronous motor. *Electrotehnika*. 2018; 9:74-76.

26. Blagodarov D.A., Safonov Y.M., Grigorian D.D., Khrumshin V.R. Limiting dynamic loads of electric drive with flexible couplings and variable inertia moment. Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus-2018. 2018. Pp. 582-584. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317165.

27. Kukishev D., Meshcheryakov V., Boikov A., Evseev A. Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive. X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). 3-6 Oct. 2018. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571784.

28. Vlashevskiy S.V., Malysheva O.A., Melnichenko O.V., Comparison of calculation traction forces on the adhesion of ac electric locomotives with an asynchronous and collector drives, *Electronics and electric equipment of transport*. 2018; 5:30-36.

29. Tomasov V.S., Usoltsev A.A., Vertegel D.A., Denisov K.M. Study of electromagnetic torque pulsations in precision servo drives with sinusoidal pulse-width modulation. *Scientific and Technical Journal of*

Information Technologies, Mechanics and Optic. 2019; 19(2): 359-368.

30. Popova O.B., Popov B.K., Karandey V.Yu., Shevtsov Yu.D., Klyuchko V.I. Theoretical propositions and practical implementation of the formalization of structured knowledge of the subject area for exploratory research. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018; 722: 432-437. DOI: 10.1007/978-3-319-73888-8_67.

31. Popova O., Shevtsov Yu., Popov B., Karandey V., Klyuchko V., Gerashchenko A. Entropy and algorithm of the decision tree for approximated natural intelligence. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018; 787:310-321. DOI: 10.1007/978-3-319-94229-2_30.

32. Popova O.B., Popov B.K., Karandey V.Yu., Shevtsov Yu.D., Klyuchko V.I. Studying an element of the information search system: the choice process approximated to the natural intelligenc. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018; 869:1150-1168. DOI: 10.1007/978-3-030-01054-6.

33. Popova O.B., Popov B.K. OPTIMEL. Certificate on official registration of the computer program № RU 2012615868 is registered 6/27/2012.

34. Karandey V.Yu., Popov B.K., Popova O.B., Afanasev V.L. Optimization of parameters of special asynchronous electric drives. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018; 327. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052002.

35. Karandey V.Yu., Popov B.K., Popova O.B., Afanasev V.L. Determination of power and moment on shaft of special asynchronous electric drives, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018; 327. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052003.

36. Karandey V.Yu., Popov B.K., Popova O.B., Afanasev V.L. Research and analysis of force and moment of the cascade asynchronous electric drives. International conference on innovations and prospects of development of mining machinery and electrical engineering 2018 (IPDME 2018). IOP conference series: earth and environmental science. 2018; 194(5). DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052009.

37. Karandey V.Yu., Popov B.K., Popova O.B., Afanasev V.L. Research dynamics of change of electromagnetic parameters of controlled special electric drives. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2019). 2019. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934751.

© 2022 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

Vladimir Yu. Karandey, head of the department of power supply of industrial enterprises, Kuban State Technological University (350072, Russia, Krasnodar, Moskovskaya str., 2), C. Sc. in Engineering, Associate Professor, epp_kvj@mail.ru

Boris K. Popov, Kuban State Technological University (350072, Russia, Krasnodar, Moskovskaya str., 2), C. Sc. in Engineering, Associate Professor,

Olga B. Popova, Kuban State Technological University (350072, Russia, Krasnodar, Moskovskaya str., 2), C. Sc. in Engineering, Associate Professor,

Viktor L. Afanasiev, Senior Lecturer, Kuban State Technological University (350072, Russia, Krasnodar, Moskovskaya str., 2)

Contribution of the authors:

Vladimir Yu. Karandey – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Boris K. Popov – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Olga B. Popova – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Viktor L. Afanasiev – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.

