

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ШКИВНЫХ СЕПАРАТОРОВ.
ЧАСТЬ 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ШКИВОВ
С РАЦИОНАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ (МЕТОДИКА)**

М. В. Загирняк, А. П. Оксанич, В. П. Ляшенко, И. А. Луценко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Полтавская обл., Украина. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

При реальном проектировании электромагнитных шкивов возникает необходимость выбора наилучшего по некоторому критерию (или критериям) варианта. Это приводит к сложной задаче проектирования электромагнитного шкива с рациональными параметрами. Определены критерии выбора наилучшего варианта электромагнитной системы шкивного сепаратора. Это масса и стоимость активных материалов, потребляемая мощность и экономический эффект. Эти критерии позволяют обосновано выбирать наилучший вариант из совокупности задач синтеза. Проведен анализ методов нелинейного программирования для решения оптимизационной задачи. Установлено, что наиболее приемлемыми методами решения этой задачи являются методы сканирования. Обосновано применение метода простого перебора с постоянным шагом для решения соответствующей задачи сразу по нескольким критериям. Произведен поиск решения оптимизационной задачи для определения области допустимых значений аргументов. Предложена методика её решения. Разработан алгоритм многокритериальной оптимизации электромагнитной системы шкива и схема подпрограммы выбора экстремального значения критерия.

Ключевые слова: шкивной сепаратор, проектирование, электромагнитная система, многокритериальная оптимизация.

**ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ШКІВНИХ СЕПАРАТОРІВ.
ЧАСТИНА 4. ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ШКІВІВ
З РАЦІОНАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ (МЕТОДИКА)**

М. В. Загирняк, А. П. Оксанич, В. П. Ляшенко, І. А. Луценко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Полтавська обл., Україна. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

При реальному проектуванні електромагнітних шківів виникає необхідність вибору найкращого за деяким критерієм (або критеріями) варіанту. Це призводить до складної задачі проектування електромагнітного шкива з раціональними параметрами. Визначено критерії вибору найкращого варіанту електромагнітної системи шківних сепараторів. Це маса і вартість активних матеріалів, споживана потужність і економічний ефект. Ці критерії дозволяють обґрунтовано обирати найкращий варіант з сукупності задач синтезу. Проведено аналіз методів нелінійного програмування для вирішення оптимізаційної задачі. Встановлено, що найбільш прийнятними методами вирішення цієї задачі є методи сканування. Обґрунтовано застосування методу простого перебору з постійним кроком для вирішення відповідної задачі відразу за кількома критеріями. Проведено пошук рішення оптимізаційної задачі для визначення області допустимих значень аргументів. Запропоновано методику її рішення. Розроблено алгоритм багатокритеріальної оптимізації електромагнітної системи шкива і схема підпрограми вибору екстремального значення критерію.

Ключові слова: шківний сепаратор, проектування, електромагнітна система, багатокритеріальна оптимізація.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Как показывают непосредственные расчеты, решение задачи синтеза электромагнитных шкивов по описанной выше методике неоднозначно: для некоторого диапазона изменения Z , существует определенный диапазон значений δ , в котором реализуется решение задачи синтеза, что и приводит к неоднозначной многовариантности комбинаций параметров (геометрических и электрических) электромагнитной системы шкива, обеспечивающих требуемое значение исходного параметра силы. В результате при реальном проектировании электромагнитных шкивов возникает необходимость выбора наилучшего по некоторому критерию (или критериям) варианта, что приводит к сложной задаче проектирования электромагнитного шкива с рациональными параметрами.

Эта задача имеет место при проектировании не только шкивных магнитных сепараторов, но и сепараторов других конструкций, практика проектирования электромагнитных систем которых показывает, что выполнение условия заданного зна-

чения удельной пондеромоторной силы магнитного поля возможно для нескольких вариантов размеров одной и той же конструкции [1]. Возникающая при этом задача выбора из всех возможных вариантов наилучшего на основе того или иного критерия в настоящее время не имеет общепризнанной методики решения, поэтому результаты, приведенные в данном разделе, могут быть полезны при проектировании электромагнитных сепараторов различных конструкций.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА НАИЛУЧШЕГО ВАРИАНТА. Так как при проектировании электротехнических устройств нельзя указать лишь один критерий, обеспечивающий выбор наилучшего варианта устройства [1–3], то на основе существующих рекомендаций [4] по учету производственных и эксплуатационных факторов требования, предъявляемые к электромагнитным шкивным сепараторам при их производстве и эксплуатации, наиболее полно отражаются следующими критериями: масса и стоимость активных материалов

(обмоточный провод и железо магнитопровода), потребляемая мощность, экономический эффект.

Заметим, что для подвесных электромагнитных железоотделителей одним из критериев оптимизации, характеризующим издержки на транспортировку и монтаж, является объем железоотделителя [1, 5–7]. Однако ввиду постоянства для заданного типоразмера шкива его ширины и диаметра указанные издержки в данном случае полностью характеризуются массой шкива. Причем, поскольку полная масса электромагнитного шкива включает в себя постоянную для каждого типоразмера массу сопутствующих изделий (подшипниковые узлы, коробка токопровода и т.д.), то в качестве одного из критериев, характеризующего проектируемый шкив, может быть принята масса активных материалов, которая различна для различных вариантов решения задачи синтеза заданного типоразмера шкива.

Постоянство массы и соответственно стоимости сопутствующих изделий приводит к тому, что изменяемой частью материальных затрат при производстве шкивов является стоимость активных материалов, которая будучи выраженной критерием приведенной стоимости P_c , позволяет учесть экономические характеристики производства. Поэтому в качестве основного критерия, характеризующего экономические показатели производства электромагнитных шкивов, принят критерий

$$P_c = P_{Fe} C_{Fe} + P_{Cu} C_{Cu}, \quad (1)$$

где P_{Fe} , C_{Fe} и P_{Cu} , C_{Cu} – масса и стоимость единицы массы соответственно стали магнитопровода и меди обмоточного провода шкива.

Чтобы охарактеризовать экономические показатели электромагнитного шкива при эксплуатации, достаточно рассматривать критерий электрической мощности, потребляемой шкивом в установившемся тепловом режиме ($P_s = P_{yd} S_{охл}$). Однако более полно производственные и эксплуатационные издержки могут быть учтены критерием годового экономического эффекта \mathcal{E}_2 , который включает в себя учет изменения следующих видов затрат: приведенные затраты равные оптовой цене; текущие издержки эксплуатации (затраты на амортизацию и электроэнергию) и сопутствующие капитальные вложения (затраты на перевозку и монтаж).

Отметим, что приведенные затраты, текущие издержки эксплуатации и сопутствующие капитальные вложения пропорционально связаны с себестоимостью шкива, его массой и мощностью [8], поэтому критерий годового экономического эффекта является для рассмотренных выше критериев их сверткой, учитывающей экономические взаимосвязи этих критериев. Но критерий годового экономического эффекта находит в последнее время все меньшее применение, поскольку он соответствует экономическим взаимосвязям производства и эксплуатации технического оборудования, характерным для планового хозяйства, основанного на государственной собственности. К сожалению, современная эко-

номическая наука не дала нового критерия для экономического эффекта, соответствующего новым экономическим отношениям.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ И ВЫБОР МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ. Перечисленные критерии дают возможность на основе учета всех факторов производства и эксплуатации электромагнитных шкивных сепараторов в каждом конкретном случае обоснованно выбрать наилучший вариант из совокупности решений задачи синтеза. При этом, если проводить такой выбор наилучшего варианта по каждому из критериев в отдельности, то соответствующая задача выбора рациональных параметров проектируемого электромагнитного шкива может быть охарактеризована как нестрогая однокритериальная оптимизационная задача.

В самом деле, согласно изложенному выше, расчет электромагнитной системы шкивного сепаратора представляет собой последовательное решение задачи синтеза для пары размеров Z и δ , которые должны перебираться так, чтобы охватить все Z и δ , дающие искомое решение задачи синтеза. С учетом этого, все значения Z и δ , для которых существует решение задачи синтеза, образуют, взятые попарно, некоторое множество, каждый элемент которого (т.е. каждая пара Z и δ) соответствует некоторому значению рассматриваемого критерия. Причем задача выбора такой пары рациональных значений Z и δ , которая соответствует экстремальному значению определенного критерия, аналогична в своей постановке задаче строгой оптимизации [3, 9]. Разница заключается лишь в том, что в случае числового расчета электромагнитной системы шкивного сепаратора соответствие между размерами Z и δ (аргументы) и критериями (функции цели) устанавливается путем числового расчета, не позволяющего в общем случае выявить некоторые обобщенные свойства функций цели, как это имеет место при решении строгой оптимизационной задачи.

Поскольку основными геометрическими размерами электромагнитного шкива, через которые можно определить все остальные, являются Z и δ , то в данном случае задача нестрогой однокритериальной оптимизации является двухмерной (относительно Z и δ) с функциями ограничений в виде уравнений задачи синтеза и габаритных ограничений. Практическое решение такой оптимизационной задачи во многом зависит от свойств функции цели и свойств функций ограничений [2, 9, 10], которые для электромагнитного шкива неизвестны. Поэтому при выборе метода решения оптимизационной задачи необходимо учитывать, что функция цели двухмерна; свойства функции цели и функций ограничений заранее неизвестны; решение оптимизационной задачи необходимо проводить сразу для нескольких функций цели.

В этой связи определенную трудность представляет использование традиционных методов нелинейного программирования, основанных на использовании производной от функций цели и ограничений: метод линейной аппроксимации, метод модифицированных функций Лагранжа [2, 3, 10, 11].

Трудности возникают также и при реализации методов, основанных на приведении задачи оптимизации с ограничениями к задаче безусловной оптимизации (метод штрафных функций) [11], так как в настоящее время нет единого эффективного метода безусловной оптимизации, независимого от функций цели [10, 11]. Отметим, что при оптимизации электромагнитных железоотделителей нашел практическое применение метод деформируемого многогранника [1], входящий в группу методов скользящего допуска [11], основанных на расширении области допустимых значений аргументов функции цели. Однако неопределенность в задании начальных значений аргументов, а также необходимость оптимизации, как функции цели, так и модифицированных условий ограничений, присущие данному методу [11], приводят к практическим трудностям использования его из-за медленной сходимости к решению [9].

Существенным недостатком упомянутых методов, ограничивающим возможность их применения, является необходимость учета при поиске оптимума наличия у функции цели локального экстремума, который надо «обходить» в поиске глобального экстремума. Кроме того, для всех этих методов характерным является то, что поиск оптимума ведется в некотором выбранном направлении (к оптимуму). Это затрудняет практическую реализацию решения при наличии нескольких функций цели ввиду возможного несовпадения направлений поиска для различных целевых функций.

Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время нет универсального метода оптимизации, применимого без ограничений к широкому кругу задач однокритериальной оптимизации [10], и если для одномерных функций цели известны практические рекомендации по выбору метода оптимизации [9, 12, 13], то для многомерных функций цели разработка таких рекомендаций находится в стадии теоретического обоснования [10, 13–15].

С учетом всего изложенного для решения соответствующей оптимизационной задачи при проектировании электромагнитных шкивов наиболее приемлемыми являются методы перебора (или сканирования), получившие теоретическое обоснование для безусловной оптимизации [10, 11], но в силу универсальности своей вычислительной процедуры, нашедшие широкое практическое применение для оптимизации с ограничениями при проектировании различных электромагнитных устройств [2, 16–18].

Основным недостатком методов перебора является большой объем вычислений [6, 11], что предопределило их применимость лишь к функциям цели двух и трех переменных [2, 6, 17, 18], для которых увеличение числа вычислений целевой функции по методу перебора не приводит к увеличению машинного времени расчета оптимума по сравнению с другими практическими методами [13]. Поэтому в рассматриваемом случае указанный недостаток не должен сказаться на получении окончательного результата; к тому же представляется весьма существенным тот выигрыш во времени, который имеет место при непосредственном программировании методов перебора для реализации решения на ЭВМ.

При этом, поскольку из всех методов сканирования самым простым и надежным является метод простого перебора с постоянным шагом [2, 6], то именно этот метод, приемлемый для решения соответствующей оптимизационной задачи сразу по нескольким критериям, и был принят для поиска рациональных параметров при расчете электромагнитных шкивных сепараторов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ АРГУМЕНТОВ И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ. Согласно изложенному, поиск решения оптимизационной задачи для электромагнитных шкивных сепараторов может быть сформулирован следующим образом: при некотором фиксированном Z с равномерным шагом перебираются все допустимые зазоры δ , для которых есть решения задачи синтеза, с фиксированием на каждом шаге вычислений (т.е. для каждой пары значений Z и δ) соответствующих значений всех принятых критериев; изменение Z с некоторым равномерным шагом в области допустимых значений и повторение расчета для δ ; выбор из всех фиксированных значений критериев экстремальных и принятие соответствующих значений Z и δ (вместе с результатами решения задачи синтеза), как искомым рациональных решений для проектируемого шкивного сепаратора.

Как следует из этой формулировки, чтобы реализовать описанный метод поиска рациональных решений для проектируемого электромагнитного шкива, необходимо осуществить предварительно определение области допустимых значений аргументов Z и δ решаемой задачи. С этой целью воспользуемся неравенством (2)

$$Z_c > Z > \delta > 0, \quad (2)$$

согласно которому область допустимых значений аргументов решаемой оптимизационной задачи (Z и δ) располагается внутри квадрата $Z_c \times Z_c$ в двумерной плоскости Z, δ (рис. 1).

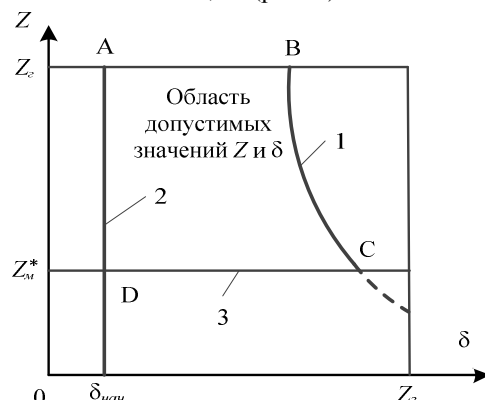


Рисунок 1 – Область допустимых значений аргументов сканирования:

- 1 – граница максимальных значений воздушного зазора; 2 – граница минимальных значений воздушного зазора; 3 – граница минимальных значений ширины полюсов

Для дальнейшей локализации области допустимых значений Z и δ учтем практические результаты решения задачи синтеза электромагнитной системы шкива, уравнения которой являются условиями ограничения (типа равенств) в рассматриваемой задаче. А именно, учтем, что при фиксированном значении Z существует некоторое максимальное значение δ , для которого еще выполняются уравнения задачи синтеза, т. е. существует ее решение. При этом с уменьшением Z происходит монотонный рост соответствующих максимальных допустимых значений δ (кривая 1). Таким образом, выбрав для фиксированного Z минимальное значение $\delta = \delta_n$ (прямая 2), перебор δ по методу сканирования производим до тех пор, пока существует решение задачи синтеза. При этом, как показывает непосредственная практика расчетов, в качестве минимального значения для δ , с которого начинается дальнейший перебор в сторону увеличения, следует принимать $\delta_n = Z/4$.

Поскольку ширина магнитопровода шкива Z_m определяет следующее ограничение на ширину шкива по полюсам [19, 20]:

$$Z \geq Z_m, \quad (3)$$

то нижней границей для Z (верхняя граница, очевидно, равна Z_c) является максимально возможное значение $Z_m = Z_m^*$ при котором еще существует решение задачи синтеза и удовлетворяется условие (3). Для определения этой нижней границы Z учтем, что, как показывает числовой расчет, при фиксированном Z различие между Z_m для минимального и максимального значений δ не превосходит 2 % (это меньше погрешности соотношений в уравнениях задачи синтеза принятой модели шкива). Кроме того, учтем, что, как показывает непосредственный расчет, Z_m является убывающей функцией Z , пересечение которой с прямой $Z_m = Z$ и дает, согласно выражению (3), искомую максимально возможную ширину магнитопровода шкива Z_m^* (рис. 2). То есть нижняя граница для Z может быть принята постоянной и равной Z_m^* для всех δ (линия 3 на рис. 1).

Рассмотренная выше локализация области допустимых значений Z и δ позволила относительно просто организовать процедуру выбора точек сканирования по методу перебора при решении рассматриваемой оптимизационной задачи. При этом сканирование осуществляется по двум циклам (внешнему по Z , и внутреннему по δ) на основе соотношений

$$Z = Z_c - (i_z - 1)\Delta Z, \quad (4)$$

$$\delta = \delta_n + (i_\delta - 1)\Delta\delta, \quad (5)$$

где i_z, i_δ – номер цикла сканирования соответственно по Z и δ ; $\Delta Z, \Delta\delta$ – постоянный шаг сканирования соответственно для Z и δ , минимальное значение которого определяется технологическим допуском на соответствующий размер ($\Delta Z = 5$ мм, $\Delta\delta = 1$ мм).

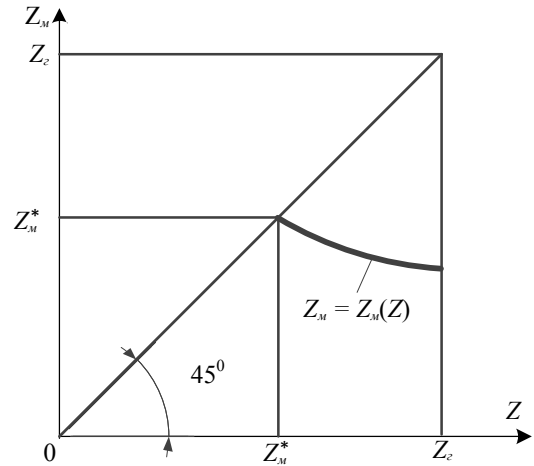


Рисунок 2 – К определению нижней границы области допустимых значений ширины полюсов

Отметим, что согласно изложенному выше перебор δ по соотношению (5) следует проводить до тех пор, пока имеется решение задачи синтеза, а перебор Z по соотношению (4) следует проводить до выполнения условия $Z_m = Z$. При этом локализованная область допустимых значений аргументов Z, δ будет покрыта прямоугольной сеткой с размерами ячейки $\Delta Z \times \Delta\delta$, узлы которой и представляют собой точки сканирования для решаемой оптимизационной задачи.

На рис. 3 приведена схема алгоритма, реализующего описанный перебор размеров Z и δ по формулам (4) и (5) с одновременным решением задачи синтеза электромагнитной системы шкивного сепаратора, а также задачи выбора рациональных размеров и других параметров этой системы по нескольким критериям. Решение последней из названных задач реализуется специальной подпрограммой OPTIMA (рис. 4), работающей следующим образом: при обращении к подпрограмме (CALL OPTIMA на рис. 3) в каждой текущей точке сканирования (пара размеров Z, δ из области допустимых значений) критерии оптимизации сравниваются с соответствующими значениями критериев в предыдущей точке сканирования, запоминаются экстремальное значение того или иного критерия (минимальное при минимизации и максимальное при максимизации его в зависимости от значения индекса J , рис. 3) и соответствующие ему значения параметров шкива, полученные при решении задачи синтеза.

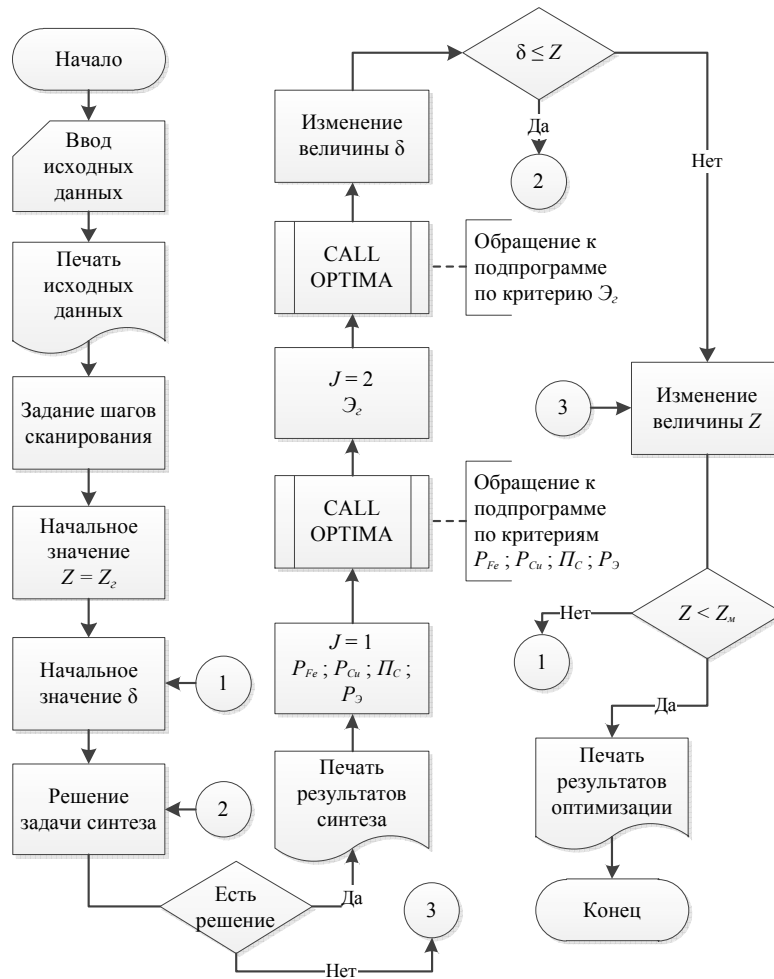


Рисунок 3 – Алгоритм многокритериальной оптимизации электромагнитной системы шкива

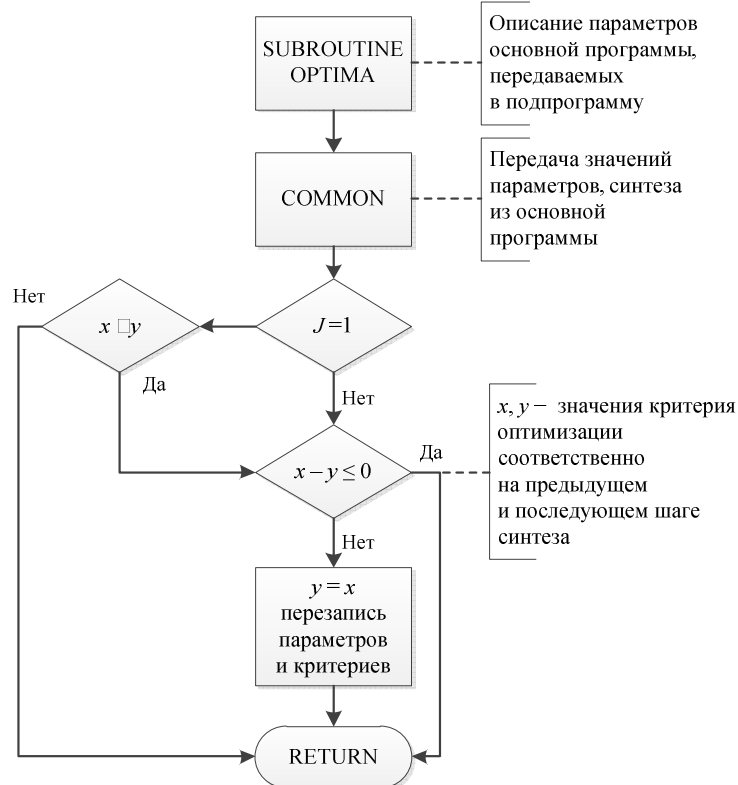


Рисунок 4 – Схема подпрограммы выбора экстремального значения критерия (подпрограмма OPTIMA)

ВЫВОДЫ. Дополнение алгоритма решения уравнений магнитной цепи и теплового баланса расчетом электрических параметров намагничивающей обмотки и представляет в целом алгоритм решения задачи синтеза электромагнитных шкивов рассматриваемой конструкции, который положен в основу методики проектирования соответствующих шкивов с рациональными параметрами.

Такая процедура решения оптимизационной задачи позволяет осуществлять поиск рациональных размеров электромагнитных шкивов сразу по нескольким критериям независимо от их количества и свойств, а изложенная методика решения оптимизационной задачи сразу по нескольким критериям является более удобной при расчете этих аппаратов по сравнению с традиционными методами многокритериальной оптимизации [18], которые могут приводить к неоднозначному решению, так как основываются на условиях субъективного предпочтения того или иного критерия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буль Б. К., Карташян В. О., Нестеренко А. П. Проектирование оптимальных электромагнитных систем подвесных железоотделителей. *Электротехника*. 1981. № 4. С. 54–57.
2. Никитенко А. Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов. М.: Высш. шк. 1983. 192 с.
3. Любчик М. А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974. 392 с.
4. Калита Н. С., Спицына Т. Ю., Кожуховский И. С. Цена и ценообразование. К.: Выща шк., 1988. 219 с.
5. Справочник техника-конструктора / Под ред. М. Я. Левицкого. К.: Техніка, 1978. 592 с.
6. Тихонов А. Н., Костомаров Д. П. Вводные лекции по прикладной математике. М.: Наука, 1984. 192 с.
7. Витенберг М. И. Расчет электромагнитных реле. Л.: Энергия, 1975. 416 с.
8. Загірняк М. В., Бранспиз Ю. А. Шкивные магнитные сепараторы. К.: Техника, 2000. 303 с.
9. Гилл Ф., Моррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.
10. Аоки М. Введение в методы оптимизации. М.: Наука, 1977. 344 с.
11. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с.
12. Моисеев Н. Н., Иванюков Ю. П., Столярова Е. М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978. 352 с.
13. Немировский А. С., Юдин Д. Б. Сложность задач и эффективность методов оптимизаций. М.: Наука, 1979. 384 с.
14. Евтушенко Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации: Оптимизация и исследование операций. М.: Наука, 1982. 432 с.
15. Стронгин Р. Г. Численные методы в многокритериальных задачах: Оптимизация и исследование операций. М.: Наука, 1978. 240 с.
16. Загірняк М. В. Исследование, расчет и усовершенствование шкивных магнитных сепараторов: Монография. К.: ИСМО, 1996. 488 с.
17. Бабис Р. С., Хублатов Н. И. Проектная оптимизация трансформаторов. *Электричество*. 1970. № 4 С. 43–47.
18. Бородулин Ю. Б., Гусев В. А., Тюрин Е. П. Расчет и оптимизация на ЭЦВМ силовых двухобмоточных трансформаторов. *Электротехника*. 1973. № 3 С. 36–39.
19. Загірняк М. В., Усатюк В. М., Оксанич А. П., Ляшенко В. П., Никитина А. В. Проектирование электромагнитных систем шкивных сепараторов. Часть 1. Постановка задачи. Решение уравнения магнитной цепи. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2015. Вип. 2/2015 (91). С. 35–42.
20. Загірняк М. В., Усатюк В. М., Оксанич А. П., Ляшенко В. П., Луценко И. А., Загорюлько В. В. Проектирование электромагнитных систем шкивных сепараторов. Часть 2. Решение уравнения теплового баланса. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2015. Вип. 3/2015 (92). С. 9–14.

DESIGNING ELECTROMAGNETIC SYSTEMS FOR PULLEY SEPARATORS. PART 4. DESIGNING ELECTROMAGNETIC PULLEYS WITH RATIONAL PARAMETERS (METHODOLOGY)

M. Zagirnyak, A. Oksanich, V. Lyashenko, I. Lutsenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Purpose. In the actual design of electromagnetic pulleys, it becomes necessary to select the best option for some criterion (or criteria). This leads to a complex problem of designing an electromagnetic pulley with rational parameters. **Methodology.** The criteria for choosing the best variant of the electromagnet system of the pulley separator are determined. This is the mass and cost of active materials, power consumption and economic effect. These criteria allow us to choose the best option from the combination of synthesis problems. **Results.** The analysis of methods of nonlinear programming for solving the optimization problem is carried out. It is established that the most acceptable methods for solving this problem are scanning methods. **Originality.** The application of the simple recourse method with a constant step for solving the corresponding problem is justified based on several criteria. **Practical value.** The solution of the optimization problem for determining the range of valid values of the arguments is searched. The method of its solution is proposed. The algorithm of multicriterial optimization of the electromagnetic pulley system and a subroutine for selecting the extreme value of the criterion are developed.

Key words: pulley separator, design, electromagnetic system, multicriteria optimization.

REFERENCES

1. Bul', B. K., Kartashyan, V. O., Nesterenko, A. P., (1981), "Designing optimal electromagnetic systems suspended separators", *Electrical engineering*, no. 4, pp. 54–57.
2. Nikitenko, A. G. (1983), *Avtomatizirovannoe proektirovanie elektricheskikh apparatov* [Computer-aided design of electrical devices], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
3. Lyubchik, M. A. (1974), *Optimalnoe proektirovanie silovykh elektromagnitnykh mekhanizmov* [Optimal design of electromagnetic power mechanisms], Energiya, Moskva, Russia.
4. Kalita, N. S., Spitsyn, T. Yu., Kozhukhovskiy, I. S. (1988) *Cena i cenoobrazovanie* [Price and Pricing]. Vysshaya shkola, Kiev, Ukraina.
5. *Spravochnik tekhnika-konstruktora* (1978), [Directory technician designer], ed. M. Ya. Levitskogo, Tekhnika, Kiev, Ukraina.
6. Tikhonov, A. N., Kostomarov, D. P. (1984), *Vvodnye lektsii po prikladnoy matematike* [Introductory Lectures on Applied Mathematics], Nauka, Moscow, Russia.
7. Vitenberg, M. I. (1975), *Raschet elektromagnitnykh rele* [Calculation of electromagnetic relays], Energiya, Leningrad, USSR.
8. Zagirnyak, M. V., Branspiz, Yu. A. (2000), *Shkivnyie magnitnyie separatoryi* [Pulley magnetic separators], Tehnika, Kiev, Ukraina.
9. Gill, F., Morrey, W., Wright, M. (1985), *Prakticheskaya optimizatsiya* [Practical optimization], Mir, Moscow, Russia.
10. Aoki, M. (1977), *Vvedeniye v metody optimizatsii* [Introduction to optimization methods], Nauka, Moscow, Russia.
11. Himmelblow, D. (1975), *Prikladnoye nelineynoye programmirovaniye* [Applied nonlinear programming], Mir, Moscow, Russia.
12. Moiseev, N. N., Ivanilov, Yu. P., Stolyarova, E. M. (1978), *Metody optimizatsii* [Optimization methods], Nauka, Moscow, Russia.
13. Nemirovsky, A. S., Yudin, D. B. (1979), *Slozhnost zadach i effektivnost metodov optimizatsiy* [Complexity of problems and efficiency of optimization methods], Nauka, Moscow, Russia.
14. Evtushenko, Yu. G. (1982), *Metody resheniya ekstremal'nykh zadach i ikh primeneniye v sistemakh optimizatsii: Optimizatsiya i issledovaniye operatsiy* [Methods for solving extremal problems and their application in optimization systems: Optimization and investigation of operations], Nauka, Moscow, Russia.
15. Strongin, R. G. (1978), *Chislennyye metody v mnogokriterial'nykh zadachakh: Optimizatsiya i issledovaniye operatsiy* [Numerical methods in multicriteria problems: optimization and investigation of operations], Nauka, Moscow, Russia.
16. Zagirnyak, M. V. (1996), *Issledovanie, raschet i usovershenstvovanie shkivnyih magnitnyih separatorov: monografiya* [Research, calculation and improvement of pulley magnetic separators: monograph], ISMO, Kiev, Ukraina.
17. Babis, R. S., Khublatov, N. I. (1970) "Project optimization of transformers", *Electricity*, no 4, pp. 43–47.
18. Borodulin, Yu. B., Gusev, V. A., Tyurin, E. P., (1973) "Calculation and optimization of power two-winding transformers on electric computers", *Electrical engineering*, no. 3, pp. 36–39.
19. Zagirnyak, M. V., Usatyuk, V. M., Oksanich, A. P., Lyashenko, V. P., Nikitina, A. V. (2015), "Design of electromagnetic pulley separators. Part 1. Problem-statement. The solution of the magnetic circuit equation", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 2(91), pp. 35–42.
20. Zagirnyak, M. V., Usatyuk, V. M., Oksanich, A. P., Lyashenko, V. P., Lucenko, I. A., Zagorulko, V. V. (2015), "Design of electromagnetic pulley separators. Part 2. Solution of the heat balance equation", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 3(92), pp. 9–14.

Стаття надійшла 12.05.2018.