

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСКРОЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Путятин В. П.¹, Путятин П. В.²¹ Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко,² Международный Соломонов университет, Восточнoукраинский филиал (г. Харьков)

Рассмотрена постановка задачи рационального раскроя электротехнического материала при производстве конденсаторов. Предложена математическая модель задачи, обсуждаются вопросы её алгоритмизации и автоматизации процесса раскроя материала.

Постановка проблемы. На сегодняшний день существуют различные технологии производства конденсаторов: от бумажно-фольговых для электроэнергетических установок до плёночных – в радиотехнике и электронике. Теория проектирования электрических конденсаторов (плоских, цилиндрических, сферических, переменной ёмкости) базируется на формулах определения соответствующих ёмкостей конденсаторов, в которые входят в качестве параметров метрические характеристики составляющих элементов конденсатора (электродов и диэлектрика). Поэтому, прежде чем решать задачу моделирования карт раскроя электротехнического материала для производства конденсаторов, необходимо предложить методику определения геометрической формы и метрических характеристик заготовок с учетом типа конденсатора, его назначения и наперёд заданной ёмкости.

Анализ последних исследований и публикаций. Формирование вектора геометрической информации [1] для постановки и решения задач раскроя, размещения, компоновки и трассировки с учетом физических процессов, протекающих в проектируемой технической системе, рассматривалось ранее в работе [2]. Работы [3 – 5] посвящены математическим моделям, методам, алгоритмам и комплексам программ для автоматизации решения задач раскроя материала с учётом только геометрической формы и заданных размеров заготовок. Однако применение последних не позволяет решать комплексную задачу раскроя материала с одновременным учётом электротехнических характеристик проектируемых заготовок для конденсаторов постоянной и переменной ёмкости. Это связано с отсутствием соответствующего математического и программного обеспечений.

Цель статьи. Рассмотреть наиболее полную постановку задачи рационального раскроя электротехнического материала при производстве конденсаторов постоянной и переменной ёмкости. Предложить математическую модель задачи, обсудить вопросы её численной реализации и автоматизации технологического процесса раскроя материала с применением станка с числовым программным управлением (ЧПУ).

Постановка задачи раскроя материала для плоского конденсатора. Имеется исходный электротехнический материал, например

прямоугольные листы фольга и диэлектрика заданных размеров ($A \times B$). Раскраиваемые заготовки имеют форму прямоугольников, размеры которых дополнительно подлежат определению по требованию обеспечения заданной ёмкости конденсатора. Требуется определить возможные допустимые размеры пластин электродов и диэлектрика и осуществить их размещение в прямоугольнике исходного раскраиваемого материала. Ориентация этих пластин задана и такова, что их стороны параллельны сторонам исходной области. Кроме того, в процессе решения задачи необходимо учесть следующие ограничения [5]: отсутствие пересечения пластин друг с другом и их принадлежность исходному раскраиваемому материалу. Кроме того, необходимо максимизировать коэффициент использования исходного материала или минимизировать площадь не занятой части исходного материала.

Ёмкость плоского конденсатора (рис. 1) можно рассчитать, используя формулу [6, с. 258]

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \quad (1)$$

где ε_0 – заданная величина диэлектрической проницаемости вакуума;

ε – заданная величина относительной диэлектрической проницаемости;

S – площадь каждой пластины конденсатора;

d – заданное расстояние между пластинами конденсатора.

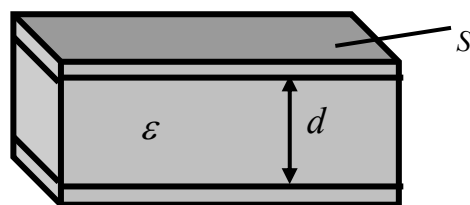


Рисунок 1 - Плоский конденсатор

При этом заметим, что соотношение (1) получается в результате применения уравнения Лапласа для расчёта электрического поля конденсатора [8, С. 67].

Соотношение (1) является приближенным и не учитывает искажающее влияние краёв пластины на распределение поля конденсатора. Более точные формулы в виде неравенств для оценки ёмкости конденсатора получены Г.Р. Киргофом, Д.К. Максфелом, Л. Релеем, В.С. Игнатовским, Г. Полия, Г. Сегё [9] и др. Однако, соотношение (1) вполне приемлемо по точности и применимо на практике для проектирования реальных конструкций конденсаторов.

Из соотношения (1) видно, что ёмкость C конденсатора является линейной функцией площади S пластины (электрода). Допустим, что необходимо производить конденсаторы заданной ёмкости $C = C^*$ из прямоугольных ($a \times b$) заготовок фольги. При этом размеры пластин электродов для разных по габаритам конденсаторов, но одинаковой ёмкости, могут быть различными, а их площади – естественно одинаковыми (свойство изопериметричности) [9].

Тогда из соотношения (1) определим $S = C^*d/\varepsilon_0\varepsilon$. При этом учитывая, что $S = ab$, получим $ab = C^*d/\varepsilon_0\varepsilon$. Зададимся допустимым значением одного из параметров, например $a = a^*$. Тогда второй параметр будет иметь значение $b^* = C^*d/\varepsilon_0\varepsilon a^*$.

На размеры ($a \times b$) пластин электродов могут накладываться технологические ограничения вида

$$a^1 \leq a \leq a^2, \quad (2)$$

$$b^1 \leq b \leq b^2, \quad (3)$$

где a^1, a^2, b^1, b^2 – заданные предельно допустимые размеры пластин электродов.

Ограничения (2 – 3) позволяют осуществлять выбор и проверку допустимости значений a^* и b^* .

Обозначим через S_i ($i = \overline{1, n}$) площади прямоугольных пластин электродов для конденсаторов. Тогда целью решения задачи раскроя может быть минимизация площади K_1 не занятой части исходной области раскроя

$$K_1 = AB - \sum_{i=1}^{i=n} S_i \rightarrow \min, \quad (4)$$

или максимизация K_2 – коэффициента использования материала

$$K_2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} S_i}{AB} \rightarrow \max. \quad (5)$$

Заметим, что аналогичную постановку имеет задача раскроя диэлектрического материала для конденсатора.

Моделирование карт раскроя материала. На рис. 2 приведена схема укрупнённого алгоритма

моделирования карт раскроя материала для производства электрических конденсаторов.

Исходными данными являются: размеры A, B областей раскроя; допустимые размеры a^1, a^2, b^1, b^2 пластин электродов конденсатора; заданная ёмкость C^* конденсатора, заданные физические величины $\varepsilon_0, \varepsilon, d$, критерий K^* останова поискового процесса раскроя материала.

После задания размеров пластин электродов, согласно описанному в предыдущем пункте способу, сравниваем размеры a^* и b^* пластин конденсатора с требованиями ГОСТ и корректируем эти значения, заменяя их ближайшими стандартными величинами. Размещаем прямоугольные пластины в исходной прямоугольной области раскроя согласно метода динамического программирования, применяемого для задач гильотинного раскроя и описанного в работе [7, с. 490, дополнение Б, программа Б.1].

Вычисляем значения функций цели по соотношению (4) или (5). Анализируем выполнение критерия K^* останова. Если критерий останова выполняется, то выводим на печать лучшие (по значениям функций цели) карты раскроя. Если соответствующие значения функций цели одинаковы для различных карт раскроя, то окончательное решение об использовании в производстве тех или иных карт принимает эксперт. Подаём результаты решения задачи раскроя (карту раскроя) на вход станка с ЧПУ для автоматизации технологического процесса лазерной гильотинной резки исходного материала.

Заметим, что задание размеров a и b размещаемых прямоугольных пластин целесообразно организовать на основе процедуры подготовки их размеров с учётом заданных ёмкостей (площадей пластин), типоразмеров и номенклатуры проектируемых плоских конденсаторов. В основу этой процедуры возможно положить результаты, полученные в работе [7, с. 458, дополнение А].

Особенности раскроя материала для цилиндрического конденсатора постоянной ёмкости. Ёмкость цилиндрического конденсатора (рис. 3) определяется как [6, с. 259]

$$C = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon \frac{L}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (6)$$

где ε_0 – заданная величина диэлектрической проницаемости вакуума;

ε – заданная величина относительной диэлектрической проницаемости;

L – высота цилиндра;

R_1, R_2 – соответственно внутренний и внешний радиусы электродов.

Соотношение (6) получается в результате применения уравнения Лапласа в цилиндрической системе координат для расчёта электрического поля конденсатора [8, с. 71].

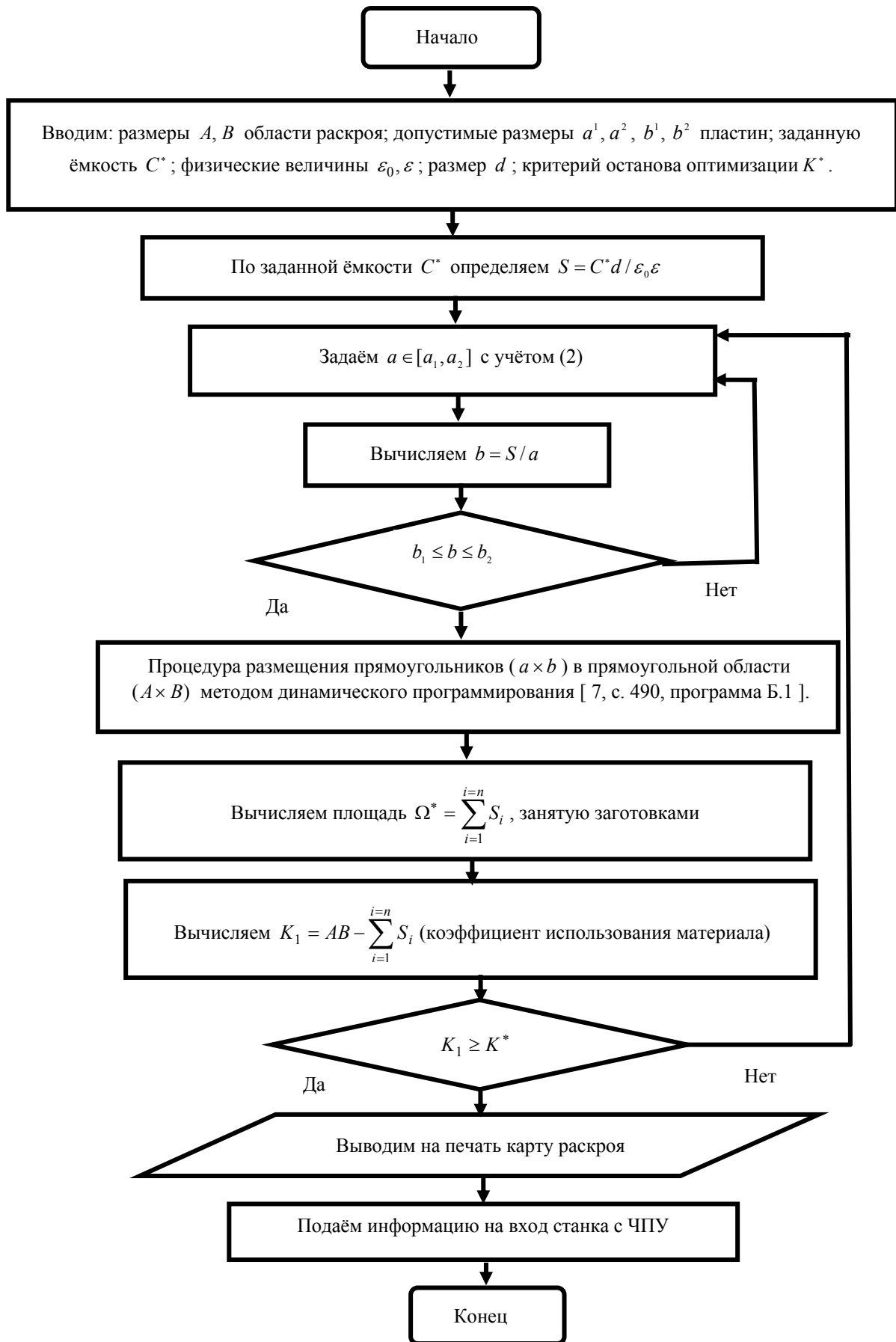


Рисунок 2 – Укрупнённая схема алгоритма моделирования карт раскроя

На основе соотношения (6) $C = C(L, R_1, R_2)$.
 Задав величину C^* ёмкости конденсатора и, например, допустимые значения величин R_1, R_2 , получим $C^* = C^*(L)$. Используя формулу (6), находим значение L и переходим к задаче раскроя электротехнического материала на прямоугольные заготовки размерами $(L \times 2\pi R_2)$ (внешняя боковая часть конденсатора).

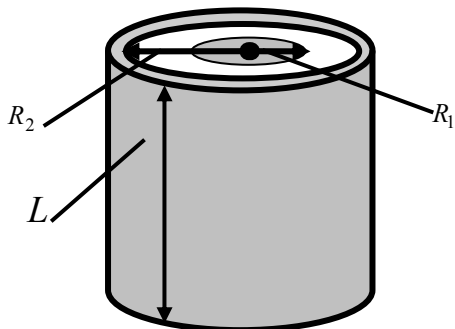


Рисунок 3 – Цилиндрический конденсатор

Особенности раскроя материала для сферического конденсатора постоянной ёмкости.
 Ёмкость сферического конденсатора (рис. 4) определяется как [6, с. 258]

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \left(\frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \right), \quad (7)$$

где R_1, R_2 – соответственно внутренний и внешний радиусы сферического электрода.

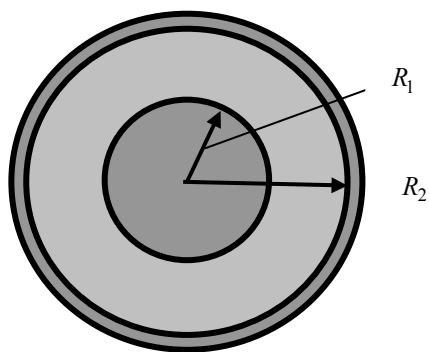


Рисунок 4 – Сферический конденсатор

Соотношение (7) получается в результате применения уравнения Лапласа в сферической системе координат для расчёта электрического поля конденсатора [8, С. 69].

Аналогично приведенному выше, $C = C(R_1, R_2)$.
 Задав величину C^* ёмкости конденсатора и, например, допустимое значение величины $R_1 = R_1^*$, получим $C^* = C^*(R_2)$.

Используя формулу (7), находим значение $R_2 = R_2^*$ и переходим к решению задачи раскроя материала для изготовления внешнего сферического электрода конденсатора радиуса R_2^* .

Особенности раскроя материала для конденсатора переменной ёмкости. Конденсатор переменной ёмкости представляет собой несколько медных или алюминиевых полудисков 1 и 2 (рис. 5), электрически соединённых между собой группами и укреплённых неподвижно.

Между группами подвижных и неподвижных полудисков имеются воздушные зазоры или расположены пластины диэлектрика. При этом заданная (максимальная) ёмкость C_{\max} конденсатора обеспечивается полным вхождением подвижной группы пластин конденсатора в группу неподвижных пластин. Минимальная ёмкость C_{\min} – отсутствием такого вхождения.



Рисунок 5 – Конденсатор переменной ёмкости

Таким образом, с точки зрения рассматриваемых задач раскроя, это задачи раскроя медных или алюминиевых листов и диэлектрика на заготовки в виде полудисков. Идея поиска радиуса полудисков по заданной суммарной ёмкости пластин конденсатора аналогична описанному выше способу и базируется на соотношении (1).

Полудиска могут быть, например, половинки круга радиуса R . При этом ёмкость C переменного конденсатора зависит от радиуса R и угла α поворота подвижной группы пластин конденсатора, т.е. $C = C(R, \alpha)$. Если в качестве полудисков используются пластины в виде половины эллипса, то $C = C(a, b, \alpha)$, где a и b характеристики малой и большой полуосей эллипса.

При этом, в случае исходной области – эллипс, можно получить два вида полудисков, в зависимости от того, как проходит его сечение: через малую или большую ось эллипса. А это приводит к получению двух типов конденсаторов переменной ёмкости с различными характеристиками.

Из последнего замечания следует, что геометрическая форма пластин конденсатора переменной ёмкости определяет характер закона

изменения его ёмкости C от угла α поворота подвижной группы пластин. На рис. 6 приведена иллюстрация этого факта, где прямая 1 – линейная зависимость C от α , кривая 2 – нелинейная зависимость, кривая 3 – например, заданная зависимость, по которой восстанавливается (проектируется) геометрическая форма пластин конденсатора.

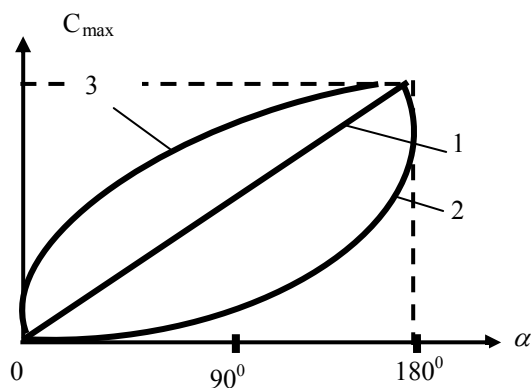


Рисунок 6 – Зависимость C от α

Важным является вопрос выбора точки объединения пластин в группы, от этого так же зависит характер изменения ёмкости C конденсатора при изменении угла α поворота подвижной группы пластин (рис. 6).

Получение карт раскроя, например, полудисков

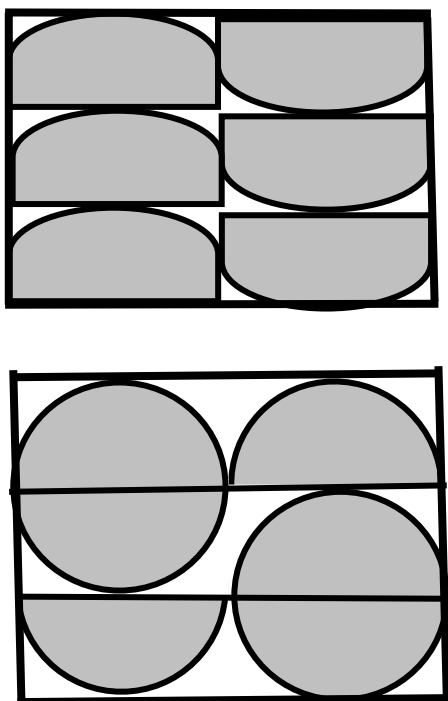


Рисунок 7 – Формирование прямоугольников для последующего гильотинного раскроя электротехнического материала

(рис. 7) можно осуществить путём постановки и решения одной из трёх самостоятельных задач: размещение только полудисков; размещение только дисков (кругов, эллипсов и т.п.); совместное размещение полудисков и дисков [5, гл. 5]. Для их решения возможно применить методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов [5]. В этом случае существенному изменению подлежит процедура размещения заготовок в вышеприведенном алгоритме (рис. 2).

На рис. 7 приведены примеры результатов решения задачи размещения полудисков при формировании прямоугольников для последующего гильотинного раскроя электротехнического материала (рис. 8). При этом ориентация полудисков задана: "диаметры" полудисков параллельны одной из сторон раскраиваемого материала.

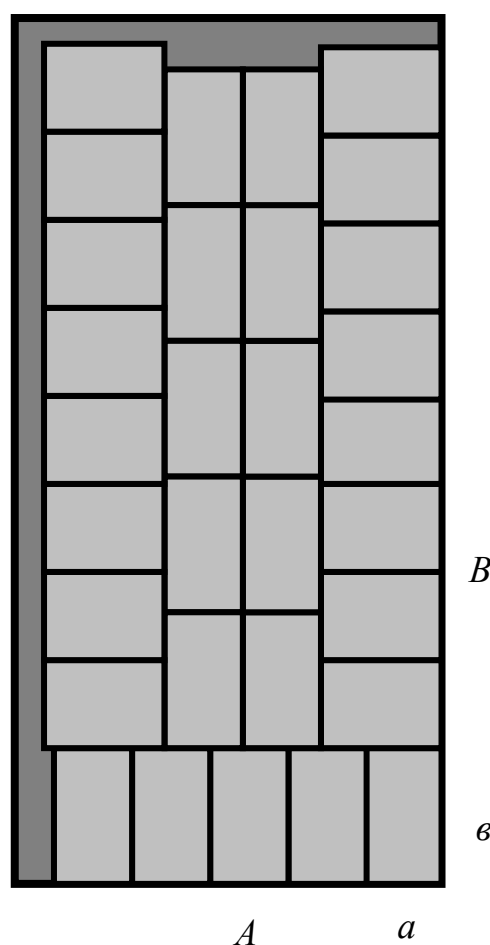


Рисунок 8 – Пример карты для гильотинного раскроя материала

Отметим, что для обеспечения технологии раскроя материала, например, основанной на гильотинном раскрое, необходимо сформировать соответствующие прямоугольники. Это, хотя и промежуточная задача размещения заданного числа полудисков в прямоугольнике минимальной площади [5], но она довольно сложная. После её решения эксперт имеет возможность выбрать наиболее "технологичный" прямоугольник для гильотинного раскроя материала и последующей фигурной резки

(штамповки) заготовок полудисков из прямоугольников.

На рис. 8 приведен пример карты раскроя электротехнического материала на прямоугольники. Размеры размещаемых прямоугольников: $a = 2,7$; $b = 4,2$. Размеры области, подлежащей раскрою: $A = 15$; $B = 27$. Площадь не занятой части раскраиваемого материала: $K_1 = 53,46$ безразмерных единиц площади, что составляет 13,2% от площади раскраиваемого материала. Коэффициент использования раскраиваемого материала: $K_2 = 0,868$.

Выводы. Исходный раскраиваемый материал и заготовки могут иметь более сложную геометрическую форму. При этом заготовки, подлежащие размещению, могут принимать произвольную ориентацию, что значительно усложняет постановку задачи раскроя, её математическую модель и численную реализацию [5].

Программное обеспечение для решения задач раскроя материала, а также получаемые карты раскроя, которые характеризуются информацией о форме, местоположении и размерах заготовок, могут быть интегрированы в станки с числовым программным управлением для лазерной резки электротехнического материала [10 – 12].

Большое практическое значение имеет задача раскроя электротехнического материала для разнотипных по геометрической форме и размерам листов исходного материала. Такая задача возникает в том случае, когда необходимо согласовать запасы раскраиваемого материала и номенклатуру производимых изделий (конденсаторов).

Предложенный в настоящей работе подход позволяет перейти к комплексному решению следующих двух задач: задачи первоначального проектирования (формообразования) заготовок по наперед заданным физико-механическим требованиям (ограничениям) к заготовкам и задачи раскроя материала с обеспечением заданных физико-механических требований к проектируемой технической системе в целом [12]. Необходимость решения таких задач возникает, например, при проектировании: отклоняющих пластин конденсаторов в электронно-оптических системах; пластинчатых радиаторов для охлаждения элементов микроэлектронной аппаратуры; составляющих компонентов электрооборудования (раскрой трансформаторной, магнитной, легированной стали); экранирующих компонентов систем защиты микроэлектронной аппаратуры от электромагнитных связей и наводок и др.

Список использованных источников

1. Стоян Ю. Г. Основная задача геометрического проектирования. – Х.: ИПМаш АН УССР, 1983. – 36 с.
2. Стоян Ю. Г. Оптимизация технических систем с источниками физических полей / Ю. Г. Стоян, В. П. Пуятин. – К.: Наук. думка, 1988. – 192 с.

3. Канторович Л. В. Рациональный раскрой промышленных материалов / Л. В. Канторович, В. А. Залгаллер. – Новосибирск: Наука, 1971. – 299 с.

4. Рвачев В. Л. Геометрические приложения алгебры логики. – К.: Техника, 1967. – 212 с.

5. Стоян Ю. Г. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов / Ю. Г. Стоян, Н. И. Гиль. – К.: Наук. думка, 1976. – 248 с.

6. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики. – К.: Наук. думка, 1986. – 864 с.

7. Грицюк Ю. І. Моделювання карт і оптимізація плану розкрою плитних деревних матеріалів на меблеві заготовки. – Львів: Панорама, 2004. – 524 с.

8. Гольдштейн Л. Д. Электромагнитные поля и волны / Л. Д. Гольдштейн, Н. В. Зернов. – М.: Сов. радио, 1971. – 664 с.

9. Полия Г. Изопериметрические неравенства в математической физике / Г. Полия, Г. Серё. – М.: Госиздат физ.-мат. литературы, 1962. – 336 с.

10. Авт. св. № 2114780. RU. Кл. B65H29/38. Способ автоматизированного раскроя листа заготовки, устройство для автоматизированного раскроя листа заготовки и механизм захвата и удаления выкроенного сегмента заготовки заданной формы. Заявлено 02.03.1994. Опублик. 10.07.1998 / Стивен Л. Беллио (US) и др.

11. Пат. № U 201103888. Україна. Кл. G06G1/06. Спосіб автоматизації розкрою електротехнічного матеріалу. Позитивне рішення від 26.08.2011 / В. П. Пуятін, А. В. Левкін, П. В. Пуятін.

12. Пуятин В. П. Автоматизация проектирования раскроя электротехнического материала / В. П. Пуятин, П. В. Пуятин // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. № 3/9 (51). – 2011. – С. 7 – 10.

Анотація

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗКРОЮ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО МАТЕРІАЛУ

Пуятін В. П., Пуятін П. В.

Розглядається постановка задачі раціонального розкрою електротехнічного матеріалу у виробництві конденсаторів. Запропоновано математичну модель задачі, обговорюються питання її алгоритмізації та автоматизації процесу розкрою матеріалу.

Abstract

COMPUTING MODELING OF ELECTROTECHNICAL MATERIAL CUTTING TEMPLATES

V. Putiatin, P. Putiatin

The formulation of the problem of rational cutting of electrical material for the manufacture of capacitors is considered. A mathematical model of the problem is proposed, its algorithmization and automation.