

К. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, А. И. ВИЛЬЧИНСКИЙ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: tkea@optima.com.ua

Дата поступления в редакцию
21.12 2009 г.

Оппонент д. т. н. И. Ш. НЕВЛЮДОВ
(ХНУРЭ, г. Харьков)

ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР СТАНДАРТНЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Предложены модели и алгоритмы выбора стандартных несущих конструкций, позволяющие оптимизировать процесс разработки электронных средств.

Несущие конструкции (НК) во многом определяют конструкцию электронных средств (ЭС), их качественные и количественные показатели, следовательно требуют эффективного применения.

В современных условиях, когда НК являются, по существу, стандартными компонентами, поставляемыми по каталогам, существует возможность выбора НК различных типов и размеров, в том числе и разработок различных фирм. Поэтому если говорить об оптимальной разработке конструкции ЭС, то следует иметь в виду, что существует проблема выбора оптимальной НК — наилучшей для разрабатываемого ЭС как по экономическим, так и по техническим показателям. В то же время, качество и сложность самого разрабатываемого ЭС зависит от используемой НК. Таким образом, необходимо оценивать не только выбранную НК, но и проект реализованного на ее основе ЭС.

В большинстве работ, посвященных НК, содержатся вопросы их синтеза и конструирования [1—5]. Однако на современном этапе развития электронных

технологий для многих отраслей промышленности более насущной стала задача оптимального выбора стандартной НК в силу очень высокого уровня международной стандартизации в части механических структур для электронного оборудования (организация по стандартизации – Международная электротехническая комиссия МЭК (IEC)) и развитого специализированного производства НК в мировых масштабах (наиболее известные фирмы-производители — Schroff и Rittal).

В настоящее время выбор варианта НК осуществляется, как правило, по каталогам путем изучения характеристик НК и сопоставления их с требованиями к разрабатываемому ЭС. Результаты выбора во многом зависят от опыта и осведомленности разработчика и не всегда являются оптимальными с точки зрения получения наилучших технико-экономических характеристик разрабатываемого изделия. В связи с этим, можно утверждать, что решение задачи оптимального выбора НК является актуальным.

Целью настоящей работы было создание моделей и алгоритмов для оптимального выбора стандартных НК при разработке ЭС.

Укрупненную схему разработки ЭС можно представить следующим образом (рис. 1) [6].

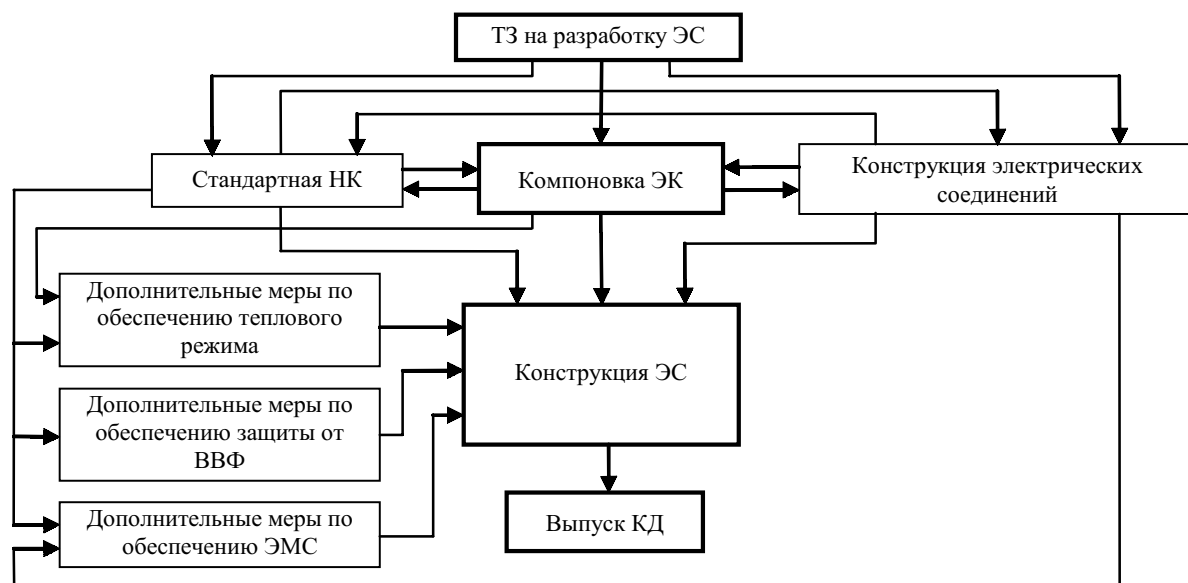


Рис. 1. Схема разработки ЭС

Оптимизация ЭС должна рассматриваться, во-первых, в аспекте достижения максимальной технико-экономической эффективности от использования самой НК, например минимизации стоимости, при условии соответствия ее технических характеристик требованиям технического задания (ТЗ) на разработку ЭС и, во-вторых, в аспекте минимизации затрат на разработку и изготовление ЭС с учетом необходимости использования дополнительных элементов конструкции, обеспечивающих размещение (компоновку) электронных компонентов (ЭК), создание электрических соединений, электромагнитную совместимость (ЭМС), нормальный тепловой режим, защиту от внешних воздействующих факторов (ВВФ).

Другими словами, можно использовать дешевую НК, но потерять на следующем этапе проектирования, усложняя конструкцию ЭС, и наоборот, выбор более дорогой НК может привести к упрощению разработки ЭС. С этих позиций и необходимо рассматривать процесс оптимизации выбора НК.

Выбор оптимального варианта НК можно вести по трем направлениям:

- 1) по ее минимальной стоимости;
- 2) по минимальной стоимости ЭС, в состав которого входит НК;
- 3) по максимальным показателям эффективности ЭС, в состав которого входит НК.

Эти варианты не равноценны как с точки зрения программной реализации, так и с позиций достоверности результатов оптимизации.

Ниже приведены математические модели оптимизации, соответствующие рассмотренным направлениям.

Модели выбора НК

1. Минимизация стоимости НК.

В этом случае модель выбора имеет вид

$$K_1 = \min \left(C + \sum_{j=1}^m t_j \right) \quad (1)$$

при ограничениях

$a_j \leq d_j$ (для случая, когда параметры ЭС максимизируются);

$b_j \geq g_j$ (для случая, когда параметры ЭС минимизируются);

$p_s \equiv f_s$ (для параметров качественной оценки).

Здесь:

C — стоимость комплекта НК, выбранного из n предлагаемых базовых комплектов НК, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_p, \dots, c_n\}$;

t_j — стоимость j -го дополнительного элемента НК;

m — количество дополнительных элементов НК (аксессуаров), необходимых для создания ЭС;

a_j, b_j, p_s — заданные параметры ЭС (известные условия задачи);

d_j, g_j, f_s — параметры, которые обеспечиваются НК.

Предполагается, что в результате перебора множества НК в пространстве поиска, заданным ограничениям будет удовлетворять какое-то подмножество НК. Оптимальной НК будет считаться та, которая имеет минимальную стоимость.

2. Минимизация стоимости ЭС, в состав которого входит НК.

Модель выбора можно представить следующим образом:

$$K_2 = \min \left(C + \sum_{j=1}^m t_j + \sum_{j=1}^v u_j \right) = \min \left(K_1 + \sum_{j=1}^v u_j \right) \quad (2)$$

при ограничениях, аналогичных ограничениям для (1), с учетом того, что d_j, g_j, f_s — параметры, которые обеспечиваются как НК, так и дополнительными элементами механической структуры.

Здесь u_j — стоимость j -го дополнительного элемента механической структуры; v — количество дополнительных элементов механической структуры, которые появляются в результате разработки варианта конструкции ЭС.

Для использования этой модели необходимо разработать в эскизном виде варианты конструкции ЭС на базе НК, которые по результатам проверки на предыдущем этапе удовлетворяют заданным ограничениям.

Эта модель более трудоемка с точки зрения реализации, однако и результаты выбора НК, очевидно, будут лучшими.

3. Максимизация показателей эффективности ЭС, в состав которого входит НК.

Модель в этом случае имеет вид

$$K_3 = \max \sum_{j=1}^z K_j \quad (3)$$

при тех же ограничениях, что и в (2).

Здесь K_j — частный критерий оценки ЭС; z — количество частных критериев.

Для решения задачи выбора оптимального варианта конструкции ЭС и, соответственно, варианта НК используем теорию пассивных игр. С ее помощью могут успешно решаться задачи с неполной исходной информацией [7].

Составляем игровую матрицу, строки которой соответствуют вариантам конструкции ЭС (иначе — стратегиям конструктора) S_i , а столбцы — частным критериям оценки ЭС K_j . В ячейки игровой матрицы заносятся достигнутые значения Π_{ij} частных критериев оценки, соответствующие различным вариантам конструкции S_i (табл. 1).

Среди частных критериев есть такие, которые максимизируются, и такие, которые минимизируются. Для того чтобы в дальнейшем выполнить свертку всех частных критериев в интегральный, необходимо их

Таблица 1

Вариант конструкции ЭС	K_1	K_2	...	K_j	...	K_z
S_1	Π_{11}	Π_{12}	...	Π_{1j}	...	Π_{1z}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
S_i	Π_{i1}	Π_{i2}	...	Π_{ij}	...	Π_{iz}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
S_m	Π_{m1}	Π_{m2}	...	Π_{mj}	...	Π_{mz}

представить таким образом, чтобы можно было их объединять, например, в виде суммы.

Представим все частные критерии в виде показателей эффективности \mathcal{E}_{ij} (выигрышей), которые всегда максимизируются:

— для максимизируемых частных критериев

$$\mathcal{E}_{ij} = K_j / E_i,$$

— для минимизируемых частных критериев

$$\mathcal{E}_{ij} = \frac{1}{K_j E_i},$$

где E_i — стоимость i -го варианта конструкции ЭС.

Представление показателей эффективности относительно стоимости позволяет использовать для оценки вариантов конструкции соотношение «качество/стоимость», т. е. одновременно с решением технической задачи учитываются и экономические составляющие.

Определив показатели эффективности, построим матрицу выигрышей (табл. 2).

Таблица 2

Вариант конструкции ЭС	K_1	K_2	...	K_j	...	K_z
S_1	\mathcal{E}_{11}	\mathcal{E}_{12}	...	\mathcal{E}_{1j}	...	\mathcal{E}_{1z}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
S_i	\mathcal{E}_{i1}	\mathcal{E}_{i2}	...	\mathcal{E}_{ij}	...	\mathcal{E}_{iz}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
S_m	\mathcal{E}_{m1}	\mathcal{E}_{m2}	...	\mathcal{E}_{mj}	...	\mathcal{E}_{mz}

Используемые частные критерии оценивают разные по физической природе параметры, которые могут быть размерными и не имеющими размерности, при этом значения каждого j -го критерия могут существенно отличаться между собой по величине. Поэтому произведем нормирование значений показателей эффективности, которые из них получены, используя следующее соотношение

$$\mathcal{E}_{ijn} = \frac{\mathcal{E}_{ij}}{\mathcal{E}_{ij\max}},$$

где \mathcal{E}_{ijn} — нормированное значение показателя эффективности ($\mathcal{E}_{ijn} \leq 1$);

$\mathcal{E}_{ij\max}$ — максимальное значение показателя эффективности по каждому частному критерию (в каждом столбце матрицы).

Не все частные критерии, равно как и их показатели эффективности, одинаково влияют на интегральный (обобщенный) показатель. Степень влияния можно учесть, умножив элементы матрицы (показатели эффективности) на коэффициенты весовости, которые можно определить, например, экспертным путем.

В результате получаем пронормированную взвешенную матрицу (табл. 3).

По подготовленной таким образом матрице можно определить лучший вариант конструкции ЭС —

Таблица 3

Вариант конструкции ЭС	K_1	K_2	...	K_j	...	K_z
S_1	\mathcal{E}_{11n}^*	\mathcal{E}_{12n}^*	...	\mathcal{E}_{1jn}^*	...	\mathcal{E}_{1zn}^*
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
S_i	\mathcal{E}_{i1n}^*	\mathcal{E}_{i2n}^*	...	\mathcal{E}_{ijn}^*	...	\mathcal{E}_{izn}^*
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
S_m	\mathcal{E}_{m1n}^*	\mathcal{E}_{m2n}^*	...	\mathcal{E}_{mjn}^*	...	\mathcal{E}_{mzn}^*

тот, который в результате свертки частных показателей эффективности даст их максимальную сумму:

$$\mathcal{E}_i = \max \sum_{j=1}^z \mathcal{E}_{ijn}^* \rightarrow S_{i\text{ опт}},$$

где $S_{i\text{ опт}}$ — оптимальный вариант конструкции ЭС.

Реализация третьей модели наиболее трудоемка, однако она позволяет расширить пространство поиска и получить наилучшие результаты по оптимизации конструкции ЭС в задачах выбора НК.

Основная трудность состоит в заполнении элементов игровой матрицы, а именно в определении значений частных критериев оценки конструкций ЭС.

В качестве частных критериев оценки ЭС могут быть использованы следующие характеристики: масса; объем; количество крепежных изделий; коэффициент сложности сборки $K_{cc} = N_{y0} / N_y$ (где N_y — число элементов НК, N_{y0} — число элементов НК, требующих регулировки в составе ЭС); электромагнитная совместимость; обеспечение требуемого теплового режима; стойкость к механическим воздействиям; стойкость к климатическим воздействиям; ремонтопригодность; требуемый уровень эргономического и художественно-конструкторского обеспечения.

С целью сокращения затрат и с учетом того, что выбор НК проводится на начальных стадиях проектирования ЭС, целесообразно значения последних шести частных критериев оценки определять посредством экспертных оценок.

Алгоритмы выбора НК

В соответствии с представленными моделями разработаны алгоритмы (рис. 2—4), которые позволяют с разной степенью точности и при различных затратах проводить выбор НК для ЭС.

Алгоритмы имеют модульную структуру. Алгоритм, соответствующий модели 1, служит начальной частью для построения алгоритма реализации модели 2. Развивая его, получаем алгоритм для модели 3, который является самым сложным и позволяет с наибольшей степенью точности вести выбор НК для ЭС. Рассмотрим отдельно каждый из них.

1. Выбор НК по показателям стоимости.

Алгоритм выбора представлен в обобщенном виде на рис. 2. Выбор НК проводится в соответствии с требованиями ТЗ. Введение и сравнение параметров ЭС с параметрами НК осуществляется в определенной последовательности. В итоге получаем список (подмножество) НК, которые удовлетворяют требованиям ТЗ. Из отобранных НК выбираем оптимальную.

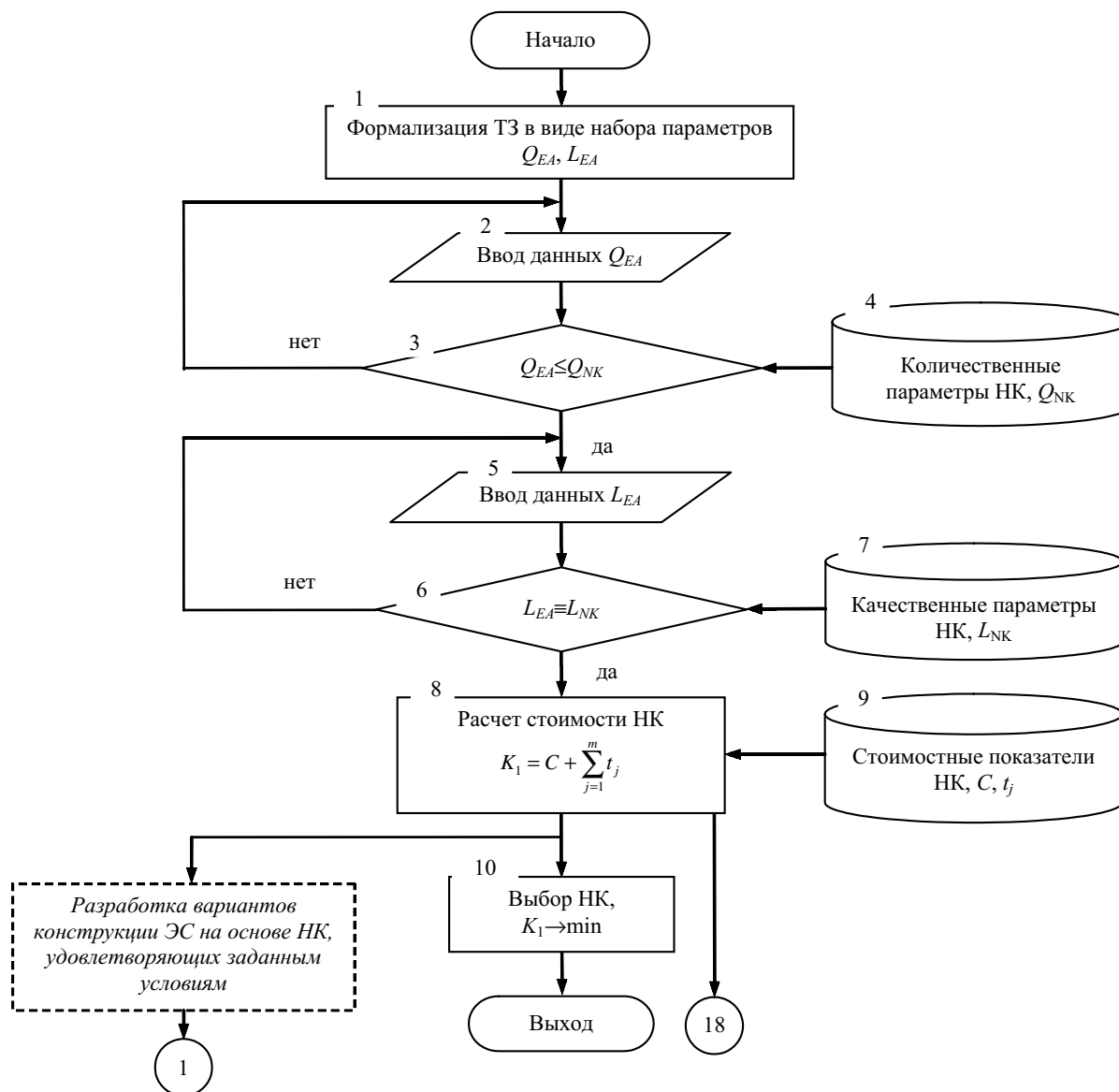


Рис. 2. Алгоритм выбора НК по показателю ее стоимости

Блок 1. Формализация требований ТЗ для представления их в виде набора параметров (ограничений) Q_{EA}, L_{EA} для возможности последующей обработки.

Блок 2. Ввод данных Q_{EA} (набор количественных параметров ЭС): M_{EA} — масса; V_{EA} — объем; W_{EA} — ширина; H_{EA} — высота; D_{EA} — длина; $S_{PP\ EA}$ — площадь печатных плат; $S_{KP\ EA}$ — площадь соединительных плат; $S_{LP\ EA}$ — площадь лицевой панели; $V_{KZ\ EA}$ — объем коммутационной зоны; $P_{V\ EA}$ — мощность, выделяемая в виде тепла.

Блок 3. Выбор вариантов НК из базы данных (блок 4) по заданным параметрам Q_{EA} . При невозможности отыскания НК с заданными параметрами разработчик вправе изменить свои требования.

Блок 4. База данных с количественными параметрами НК Q_{NK} : $M_{NK}, V_{NK}, W_{NK}, H_{NK}, D_{NK}, S_{PP\ NK}, S_{KP\ NK}, S_{LP\ NK}, V_{KZ\ NK}$, мощность, рассеиваемая при естественной конвекции $P_{V\ NK}$. Кроме последнего,

названия этих параметров НК соответствуют названиям параметров ЭС.

Блок 5. Ввод данных L_{EA} (набор качественных параметров ЭС): Nr_{EA} — наличие ручек; Nrp_{EA} — наличие ручек-подставок; Nkr_{EA} — наличие кронштейнов для крепления; Nn_{EA} — наличие ножек; Vum_{EA} — вертикальная установка модулей I уровня; Gum_{EA} — горизонтальная установка модулей I уровня; Kum_{EA} — комбинированная установка модулей I уровня; $Olpr_{EA}$ — общая лицевая панель; Lp_{EA} — лицевая панель в составе модулей I уровня; Np_{EA} — наличие перфорации; Mpo_{EA} — возможность установки модулей принудительного охлаждения; Opo_{EA} — возможность установки отдельных элементов принудительного охлаждения; Ov_{EA} — наличие отсеков для вентиляции; Sv_{EA} — стойкость к вибрации; Su_{EA} — стойкость к ударам; Ki_{EA} — климатическое исполнение; Nee_{EA} — наличие элементов экранирования.

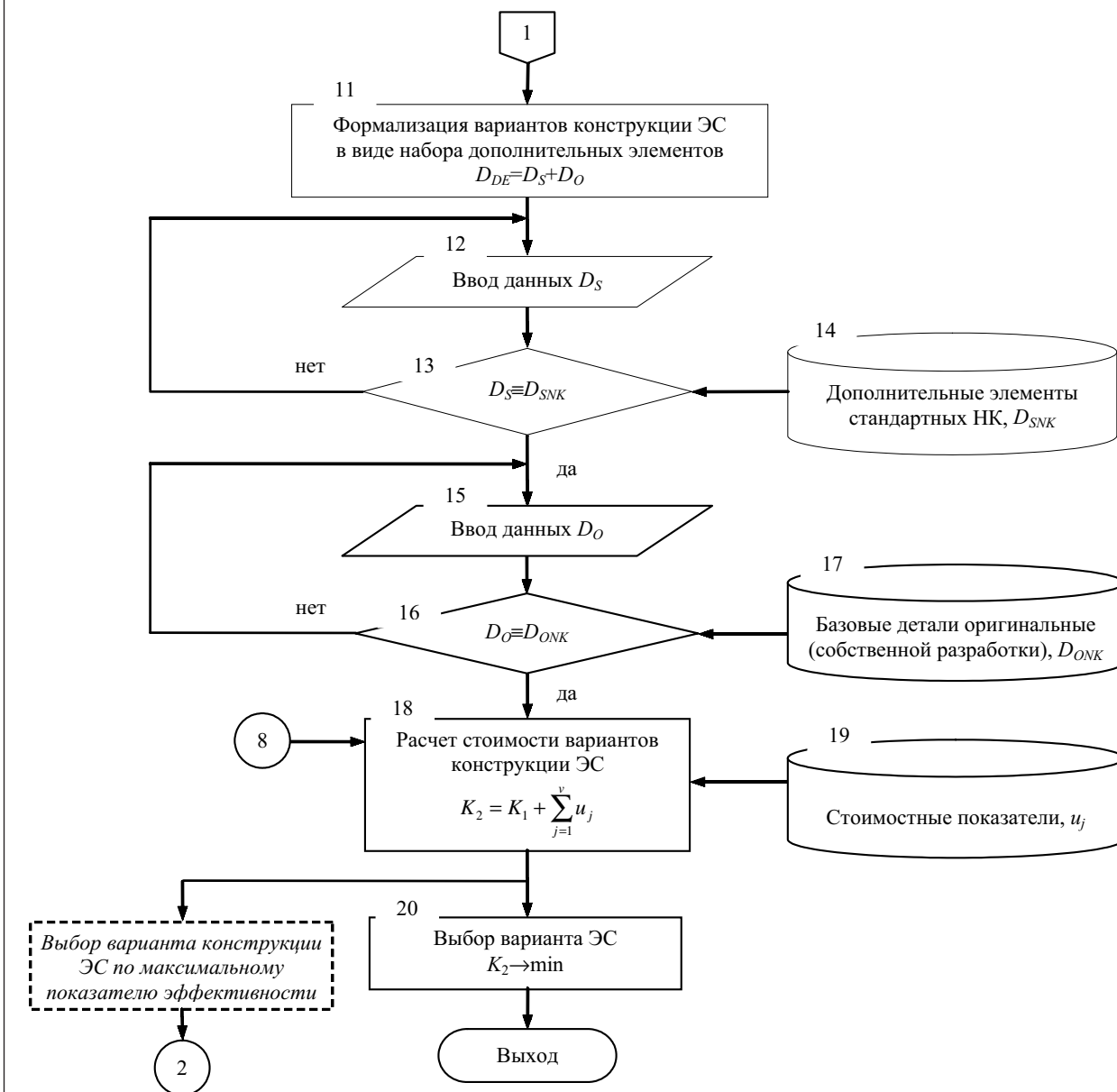


Рис. 3. Алгоритм выбора НК по показателям стоимости ЭС (продолжение рис. 2)

Блок 6. Выбор НК из списка НК, выбранных на предыдущих этапах, параметры $L_{НК}$ которых удовлетворяют заданным параметрам L_{EA} . При невозможности выбора НК с заданными качественными характеристиками, разработчик может «смягчить» свои требования.

Блок 7. База данных с параметрами НК $L_{НК}$, имеющими качественную оценку: $Nr_{НК}$, $Nrp_{НК}$, $Nkr_{НК}$, $Nn_{НК}$, $Vum_{НК}$, $Gum_{НК}$, $Kum_{НК}$, $Olp_{НК}$, $Lp_{НК}$, $Np_{НК}$, $Mpo_{НК}$, $Opo_{НК}$, $Ov_{НК}$, $Sv_{НК}$, $Su_{НК}$, $Ki_{НК}$, $Nee_{НК}$. Названия этих параметров НК соответствуют названиям параметров ЭС.

Блок 8. Расчет стоимости НК, которые соответствуют требованиям разрабатываемого ЭС на основании базы данных (блок 9).

Блок 9. База данных со стоимостными показателями базовых комплектов НК (C) и дополнительных элементов (t_j).

Блок 10. Из полученного подмножества НК выбираем НК с минимальной стоимостью.

2. Выбор НК с учетом разработки вариантов конструкции ЭС и сравнения их по показателю стоимости.

Алгоритм выбора представлен на рис. 2, 3.

По результатам полученного подмножества НК, удовлетворяющего заданным ограничениям, разрабатывается соответствующее количество вариантов конструкции ЭС, которые дополняются необходимыми конструктивными элементами, связанными с обеспечением ЭМС, защитой от ВВФ, обеспечением тепловых режимов, созданием электрических соединений. Выбирается из них тот, стоимость которого будет наименьшей. Дополнительные конструктивные элементы могут быть как стандартными (D_S), так и оригинальными (D_O), т. е. могут представлять собой детали собственной разработки.

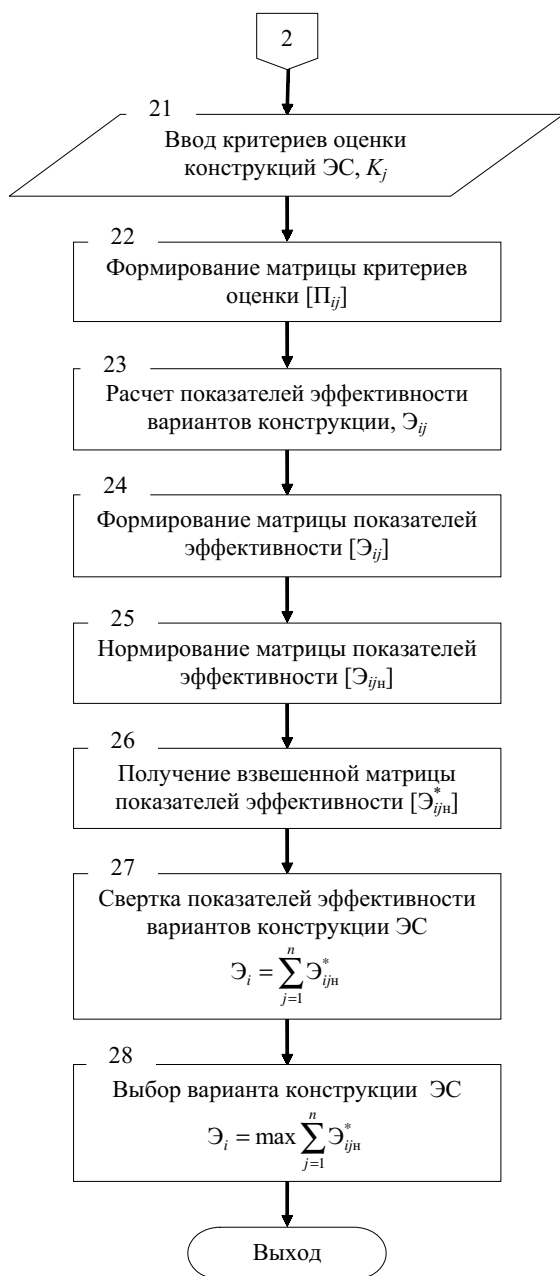


Рис. 4. Алгоритм выбора НК по показателям эффективности ЭС (продолжение рис. 2 и 3)

Блок 11. Представление вариантов конструкции в виде набора дополнительных элементов D_{DE} .

Блок 12. Ввод дополнительных элементов, которые предположительно могут быть стандартными.

Блок 13. Сравнение введенных элементов с элементами стандартных НК, представленных в базе данных (блока 14). Если существует несоответствие, то оно может быть устранено путем некоторой доработки варианта конструкции ЭС.

Блок 15. Ввод дополнительных элементов, которые являются оригинальными (сюда попадают элементы, которые не определились как стандартные).

Блок 16. Сравнение введенных элементов с элементами, представленными в базе данных блока 17.

Если некоторых элементов в базе данных нет, то может быть проведена доработка этих элементов до уровня соответствия или же пополнение базы данных новыми элементами.

Блок 18. Проводится расчет стоимости разработанных вариантов конструкции ЭС. При этом используются данные по стоимости НК (составляющей K_1), полученные в блоке 8, и данные из блока 19.

Блок 19. База данных со стоимостными показателями (u_j) дополнительных элементов механической структуры.

Блок 20. Выбор варианта конструкции с наименьшей стоимостью.

3. Выбор НК с учетом разработки вариантов конструкции ЭС и сравнения их по показателям эффективности ЭС.

Алгоритм выбора представлен на рис. 2, 3, 4.

Проводится расчет показателей эффективности для каждого варианта конструкции и выбирается из них тот вариант, обобщенный показатель эффективности которого будет максимальным.

Содержание блоков алгоритма, представленного на рис. 4, соответствует методу решения задачи оптимизации, который подробно описан выше.

Разработанные модели и алгоритмы позволяют подойти к практической реализации выбора оптимальных НК с различной степенью детализации на ранних стадиях проектирования для различных условий разработки и производства ЭС, удовлетворяя разнообразные запросы разработчиков и производителей ЭС.

Дальнейшее применение моделей и алгоритмов целесообразно развивать в направлении создания программного продукта и баз данных, что позволит использовать средства автоматизированного проектирования для оптимизации и ускорения процесса проектирования ЭС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. П. И. Овсичера.— М.: Радио и связь, 1988.
2. Лутченков Л. С. Оптимальное проектирование несущих конструкций как сложных систем.— Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990.
3. Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций РЭС.— М.: Радио и связь, 1991.
4. Ефименко А. А. Создание системы базовых несущих конструкций – требование времени // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1993.— № 3—4.— С. 10—12.
5. Ефименко А. А. Проблемы развития базовых несущих конструкций для современных радиоэлектронных средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1997.— № 3.— С. 9—13.
6. Ефименко А. А., Вильчинский А. И. Модель электронных средств, разрабатываемых на основе стандартных несущих конструкций // Тр. 10-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2009».— Одесса.— 2009.— Т II.— С. 35.
7. Фролов В. А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС: Учеб. пособие.— К.:Выща шк., 1991.