
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.311.44
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-14-24

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В. В. КАРАГОДИН, К. А. ПОЛЯНСКИЙ, В. А. ГОРИН

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vladimirkar@rambler.ru*

Рассматривается задача структурно-параметрической оптимизации системы бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей. Разработаны математические модели задачи. Критерием оптимальности является экономический показатель, в качестве которого выбран минимум капитальных вложений или приведенных годовых затрат, а требуемый уровень надежности электроснабжения с учетом возможности резервирования источников бесперебойного питания учитывается в виде ограничений. Исследована зависимость коэффициента полезного действия параллельно работающим статических источников бесперебойного питания от степени их загрузки. На основе анализа методов решения задач дискретной оптимизации обосновано применение метода „ветвей и границ“. Представлена разработанная авторами программа для решения задачи и приведен пример решения для конкретных начальных условий.

***Ключевые слова:** оптимизация, система бесперебойного электроснабжения, ответственный потребитель, приведенные затраты, капитальные затраты, надежность электроснабжения*

Введение. Современный этап развития технических и технологических систем характеризуется, в частности, повышением требований ответственных потребителей к качеству электрической энергии, надежности и бесперебойности электроснабжения. Под ответственными потребителями понимаются потребители, нарушение электроснабжения которых приводит к невыполнению функций объекта. В настоящее время не решена проблема обеспечения заданного уровня надежности в электроэнергетике РФ [1], что приводит к существенному возрастанию роли систем автономного (резервного) электроснабжения, а также систем бесперебойного и гарантированного электроснабжения. Этим обуславливается необходимость разработки новых подходов к построению таких систем с использованием современного оборудования, обладающего повышенной надежностью, а также экологической и технологической безопасностью [2].

Неотъемлемой частью современных автономных энергетических комплексов являются системы бесперебойного электроснабжения (СБЭ). Такая система представляет собой электроустановку, которая предназначена для автономного электроснабжения потребителей в случаях отклонения показателей качества электрической энергии, поступающей от основных источников, за пределы допустимых значений [3]. Основным функциональным элементом

СБЭ, предопределяющим ее эффективность, является источник бесперебойного питания (ИБП).

Для построения СБЭ ответственных потребителей могут быть использованы ИБП различного типа, как статические (двойного преобразования), так и динамические (дизель-роторные, гибридные, маховичные). Выбор ИБП двойного преобразования при построении рассматриваемых в статье СБЭ обусловлен рядом их преимуществ по сравнению с динамическими, прежде всего, по показателям надежности [4, 5].

Постановка задачи построения СБЭ. Анализ задачи обеспечения электроснабжения ответственных потребителей [6] показал, что в зависимости от требований к надежности, бесперебойности и качеству электрической энергии, количества и мощностей потребителей, условий размещения основного оборудования СБЭ и других факторов построение систем бесперебойного электроснабжения может осуществляться по различным схемам, обеспечивающим генерирование электроэнергии в необходимом количестве и требуемого качества. С учетом большой номенклатуры и широкого ряда номинальных мощностей ИБП, нелинейного характера зависимости стоимости данных устройств от их номинальной мощности, возможности резервирования ИБП и других аспектов вполне очевидно, что для определения оптимальной структуры СБЭ должна быть предусмотрена возможность сравнения основных показателей эффективности для различных приемлемых вариантов построения системы. Это приводит к необходимости рассмотрения задачи построения СБЭ на базе ИБП двойного преобразования как оптимизационной задачи по какому-либо одному или нескольким критериям эффективности. К показателям эффективности СБЭ можно отнести [7] энергетические, экономические и конструктивные показатели, показатели качества электроэнергии, показатели надежности и др.

Как правило, задача оптимизации СБЭ сводится к определению минимума экономических затрат с учетом вероятного ущерба от снижения надежности электроснабжения. Но для некоторых объектов (например, военных) такой ущерб не может быть оценен экономически, и доминирующее значение по сравнению с экономическими показателями имеют показатели надежности. Тем не менее оптимальной следует считать СБЭ, которая, обеспечивая заданные технические показатели, имеет к тому же и наилучшие экономические показатели. Поэтому при разработке математической модели задачи построения оптимальной СБЭ будем учитывать два главных показателя эффективности: в качестве экономического показателя — капитальные или приведенные годовые затраты, в качестве показателя надежности — вероятность безотказной работы. В этом случае возможны два варианта постановки однокритериальной оптимизационной задачи.

Первый вариант — при заданном ограничении F_3 на экономические затраты $F(X)$ максимизировать надежность системы (вероятность безотказной работы) $p(X)$ на дискретном (конечном или счетном) множестве D вариантов построения СБЭ, имеющих различные показатели надежности и стоимости:

$$\left. \begin{array}{l} p(X) \rightarrow \max; \\ X \in D \\ F(X) \leq F_3, \end{array} \right\} \quad (1)$$

где $X \in D$ — векторный аргумент.

Второй вариант — минимизировать экономические затраты $F(X)$ на СБЭ при заданном ограничении на показатель безотказности ее функционирования (не меньше требуемой вероятности $p_{\text{тр}}$ безотказной работы СБЭ):

$$\left. \begin{array}{l} F(X) \rightarrow \min; \\ X \in D \\ p(X) \geq p_{\text{тр}}. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Поскольку среди множества вариантов построения СБЭ может быть несколько вариантов, удовлетворяющих требованиям надежности, оптимальным следует считать вариант построения системы, имеющий наилучшие экономические показатели. Поэтому в статье рассматривается второй вариант постановки задачи, в котором в качестве критерия оптимальности принят экономический показатель, а надежность системы учитывается в виде ограничений.

Математическая постановка задачи структурно-параметрической оптимизации СБЭ. При разработке математической модели задачи построения оптимальной СБЭ будем учитывать ряд допущений:

— капитальные затраты на построение СБЭ равны сумме стоимостей ИБП, входящих в ее состав;

— возможна параллельная работа ИБП одинаковой номинальной мощности, при этом средствами объединения „в параллель“ оснащены ИБП всего ряда номинальных мощностей;

— ИБП одного модельного ряда имеют равные вероятности безотказной работы;

— допускается объединение одиночных ответственных потребителей в отдельные группы.

Введем следующие переменные, подлежащие определению в ходе решения оптимизационной задачи:

$$x_{ijn} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й потребитель (группа) подключен} \\ & \text{к группе из } n \text{ параллельно работающих} \\ & \text{основных ИБП } j\text{-й номинальной мощности,} \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases} \quad (3)$$

$$x'_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й потребитель (группа) подключен} \\ & \text{к группе из } k \text{ параллельно работающих} \\ & \text{резервных ИБП } j\text{-й номинальной мощности,} \\ 0 & \text{— иначе.} \end{cases}$$

В зависимости от того, какой экономический показатель оценивается целевой функцией (суммарные капитальные затраты или приведенные годовые затраты), возможны различные варианты математической постановки оптимизационной задачи.

Первоначально в качестве целевой функции рассмотрим суммарные капитальные затраты на построение СБЭ всех ответственных потребителей и/или групп этих потребителей [8].

Перечисленные выше допущения и введенные переменные позволяют записать математическую модель:

$$K_i(X) = \sum_{j=1}^l c_j \left(\sum_{n=1}^m n x_{ijn} + \sum_{k=1}^{m-1} k x'_{ijk} \right) \rightarrow \min; \quad X \in D \quad (4)$$

$$x_{ijn}, x'_{ijk} = \{0, 1\}; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^l \sum_{n=1}^m n S_j x_{ijn} \geq \frac{k_3 k_{c_i} P_{\text{НОМ}_i}}{\cos \varphi_i}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^l \sum_{n=1}^m x_{ijn} \leq 1, \sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^{m-1} x'_{ijk} \leq 1; \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^m x_{ijn} - \sum_{k=1}^{m-1} x'_{ijk} \geq 0; \quad (8)$$

$$(P_{\text{ИБП}}^n - p_{\text{тp}i}) \sum_{j=1}^l x_{ijn} + \sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^{m-n} x'_{ijk} \Delta p_{n/k} \geq 0, \quad (9)$$

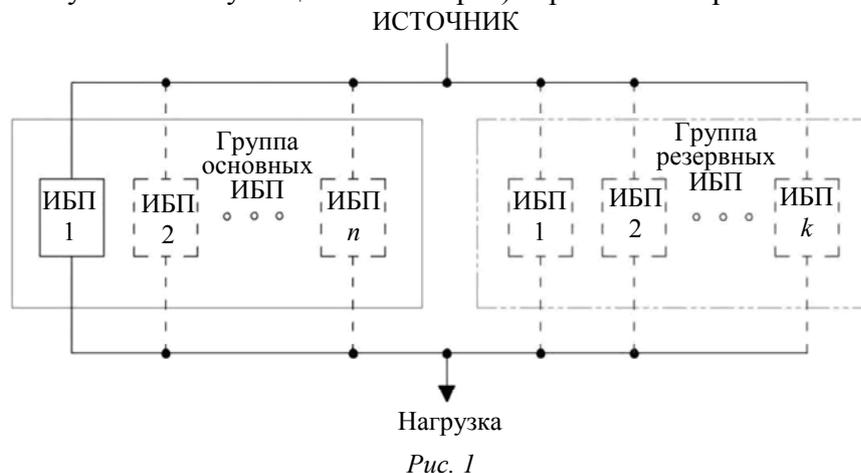
где $K_i(X)$ — капитальные затраты на построение СБЭ i -го, $i \in 1, 2, \dots, g$, потребителя (группы); g — общее количество одиночных потребителей (h) и отдельных групп потребителей (s); c_j — стоимость ИБП j -й номинальной мощности; l — номер ИБП максимальной номинальной мощности; m — максимальное количество ИБП, включаемых параллельно; S_j — номинальная мощность j -го ИБП; k_{c_i} — коэффициент спроса i -го потребителя (группы), для одного электроприемника следует принимать равным 1; $P_{\text{ном}i}$ — установленная активная мощность i -го потребителя (группы); $\cos \varphi_i$ — коэффициент мощности i -го потребителя (группы); k_3 — коэффициент запаса, $k_3 = 1, 1 \dots 1, 2$; $p_{\text{ИБП}}$ — вероятность безотказной работы одного ИБП; $p_{\text{тp}i}$ — требуемая вероятность безотказной работы СБЭ i -го потребителя; $\Delta p_{n/k}$ — разность между вероятностью безотказной работы системы, состоящей из n основных и k резервных агрегатов, и вероятностью безотказной работы системы без резервных агрегатов:

$$\Delta p_{n/k} = \sum_{u=1}^{u=k} \frac{(n+k)!}{u!(n+k-u)!} (1 - p_{\text{ИБП}})^u p_{\text{ИБП}}^{n+k-u}. \quad (10)$$

Выражение (4) оптимизационной модели (3)—(9) соответствует критерию минимума капитальных затрат. Выражения (5)—(9) являются ограничениями рассматриваемой оптимизационной задачи и позволяют учитывать следующие математические и технические условия:

- условие бинарности переменных (5);
- требование ответственных потребителей по обеспечению электроэнергией в заданном количестве (6);
- условие сингулярности варианта электроснабжения каждого потребителя (группы) (7);
- условие равенства номинальных мощностей основных и резервных ИБП (8);
- условие обеспечения требуемой вероятности безотказной работы (9).

Вероятность безотказного функционирования СБЭ определяется в первую очередь вероятностью безотказной работы ИБП и кратностью их резервирования, при этом может быть использован структурный вид резервирования с постоянно включенным и нагруженным режимом работы резерва [9] (рис. 1). Современные ИБП допускают резервирование с дробной кратностью, что позволяет снизить стоимость СБЭ. В разработанной математической модели такая возможность может быть использована для определения оптимального по капиталовложениям (т.е. без учета эксплуатационных затрат) варианта построения СБЭ.



Учет эксплуатационных расходов в математической модели задачи структурно-параметрической оптимизации СБЭ. Для учета эксплуатационных расходов предлагается использовать в качестве критерия оптимальности не минимум капитальных вложений, а минимум приведенных годовых затрат:

$$Z(X) = C_{\Sigma}K(X) + C(X) \rightarrow \min_{X \in D}, \quad (11)$$

где C_{Σ} — суммарный коэффициент отчислений, зависящих от объема капитальных вложений в СБЭ, $C_{\Sigma} = 0,1925$ [10]; $C(X)$ — стоимость потерь электрической энергии за год.

Будем считать, что потери электрической энергии в СБЭ равны сумме потерь в ИБП, входящих в ее состав, так как потери в остальных элементах системы незначительны и почти не зависят от выбора варианта ее построения. Поскольку на параллельную работу включаются ИБП только одинаковой номинальной мощности (соответственно нагрузка распределяется между ними равномерно), то стоимость потерь в СБЭ за год может быть вычислена по формуле

$$C_{\text{СБЭ}} = zC_{\text{ИБП}} = c_{\text{ээ}}TP_p \left(1 - \frac{\eta(\kappa)}{100} \right), \quad (12)$$

где z — количество параллельно работающих ИБП на общую нагрузку; $C_{\text{ИБП}}$ — стоимость потерь электрической энергии в ИБП за год; $c_{\text{ээ}}$ — стоимость электрической энергии; $T = 8760$ ч (год); P_p — расчетная активная мощность общей нагрузки; η — коэффициент полезного действия ИБП; κ — коэффициент загрузки ИБП.

Учитывая, что в реальных системах, как правило, ИБП работают при неполной загрузке и использование в расчетах значения КПД при 100%-ной загрузке может привести к недооценке потерь электрической энергии [11], необходимо рассматривать КПД ИБП как функцию от степени его загруженности. Такая ситуация может возникать вследствие ряда причин, основная из которых заключается в том, что для обеспечения высоких показателей надежности электроснабжения ответственных потребителей используется резервирование. Другие причины — дискретность ряда номинальных мощностей ИБП; запас мощности в расчете на дальнейшее развитие системы; запас мощности для обеспечения устойчивой работы ИБП.

Значения η для различных значений κ определяются экспериментально и приводятся, как правило, в техническом описании к конкретной модели ИБП. Для исследования характера этой зависимости используем данные для типового ИБП [12]. График, построенный по экспериментальным данным, представлен на рис. 2.

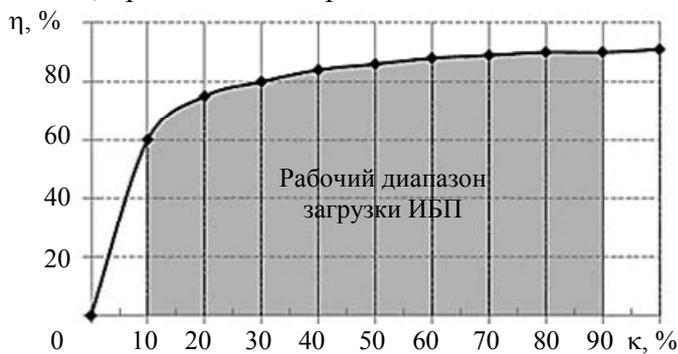


Рис. 2

Коэффициент загрузки ИБП определяется его номинальной мощностью и количеством параллельно работающих агрегатов на общую нагрузку. С учетом принятых обозначений и переменных можно записать выражение для определения коэффициента загрузки:

$$\kappa_i = \frac{100S_{pi}}{zS_{ИБП}} = \frac{100k_{ci}P_{НОМ_i}}{\cos \varphi_i \sum_{j=1}^l S_j \left(\sum_{n=1}^m nx_{ijn} + \sum_{k=1}^{m-1} kx'_{ijk} \right)}, \quad (13)$$

где κ_i — коэффициент загрузки ИБП i -го потребителя (группы); S_{pi} — расчетная полная мощность i -го потребителя (группы); $S_{ИБП}$ — номинальная мощность каждого из параллельно работающих ИБП.

Для исследования зависимости (13) проведем аппроксимацию функции $\eta = f(\kappa^{-1})$. Для этого построим уравнение регрессии. Поскольку в реальных СБЭ, как правило, значение коэффициента загрузки каждого ИБП составляет от 10 до 90 % (см. рис. 2), то достаточно будет определить функцию регрессии при $\kappa^{-1} \in [0,01; 0,1]$.

С использованием метода наименьших квадратов [13] получено следующее уравнение регрессии:

$$\tilde{\eta}(\kappa^{-1}) = k_0\kappa^{-1} + k_1 = -341,8\kappa^{-1} + 93,19, \quad (14)$$

где k_0, k_1 — коэффициенты уравнения регрессии.

Диаграмма рассеяния и линия регрессии приведены на рис. 3.

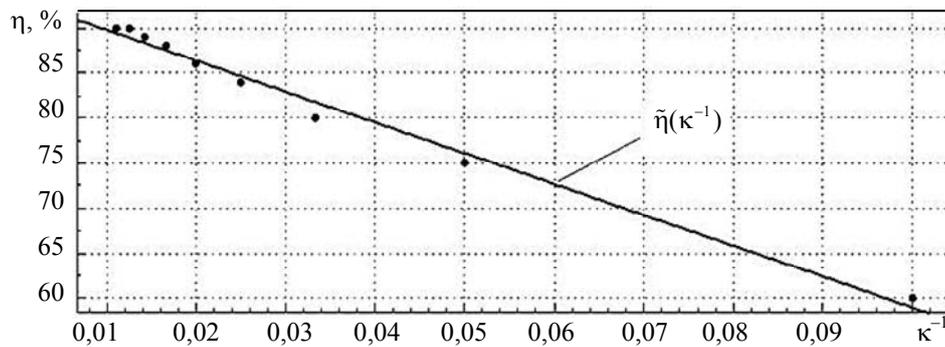


Рис. 3

Проверка соответствия выбранного класса функции регрессии экспериментальным данным, выполненная по критерию Фишера, подтвердила правильность принятой гипотезы о линейном характере данной зависимости. Коэффициент детерминированности R^2 составил 0,9893. Это говорит о том, что уравнение регрессии (14) достаточно точно описывает исходные экспериментальные данные.

С учетом (13) и (14) выражение (12) для i -го потребителя может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} C_i(X) &= c_{э3}TP_{pi} \left(1 - \frac{k_0\kappa^{-1} + k_1}{100} \right) = \\ &= c_{э3}Tk_{ci}P_{НОМ_i} \left(1 - \frac{k_1}{100} \right) - \frac{k_0c_{э3}T \cos \varphi_i}{10^4} \sum_{j=1}^l S_j \left(\sum_{n=1}^m nx_{ijn} + \sum_{k=1}^{m-1} kx'_{ijk} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Подстановкой уравнений (4) и (15) для определения $C_i(X)$ и $K_i(X)$ в (11) получено выражение для критерия минимума приведенных затрат на СБЭ i -го потребителя (группы):

$$Z_i(X) = \sum_{j=1}^l \left(C_{\Sigma}c_j - \frac{S_jk_0c_{э3}T \cos \varphi_i}{10^4} \right) \left(\sum_{n=1}^m nx_{ijn} + \sum_{k=1}^{m-1} kx'_{ijk} \right) + c_{э3}Tk_{ci}P_{НОМ_i} \left(1 - \frac{k_1}{100} \right) \rightarrow \min_{X \in D}. \quad (16)$$

Подход к решению оптимизационной задачи. Математические модели (3)—(9), (16) позволяют сформировать множество оптимальных структур СБЭ, обеспечивающих минимум капитальных (4) или приведенных годовых (16) затрат для всех одиночных ответственных потребителей и/или всех возможных их объединений в отдельные группы. В общем виде решение каждой из задач характеризуется выражением

$$X_i^* = \arg \min_{X \in D} F_i(X), \quad (17)$$

где $F_i(X)$ — экономические затраты (капитальные вложения или приведенные годовые затраты) на построение СБЭ i -го потребителя (группы потребителей), и представляет собой массив переменных, значения которых обеспечивают достижение минимума целевой функции при заданных ограничениях. Из полученного множества необходимо выбрать оптимальный вариант построения СБЭ. При небольшом количестве одиночных потребителей ($h \leq 3$) определение оптимального варианта СБЭ из множества структур является достаточно простой задачей, в противном случае задача усложняется.

Задача выбора оптимального варианта построения СБЭ также может быть поставлена как оптимизационная. Для получения ее математической модели введем следующие переменные:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й потребитель (группа) подключен к СБЭ,} \\ 0 & \text{— иначе.} \end{cases} \quad (18)$$

Целевая функция, представляющая собой суммарные экономические (капитальные или приведенные годовые) затраты на СБЭ всех одиночных потребителей и отдельных групп, определяется как

$$F_\Sigma(Y) = \sum_{i=1}^g F_i(X_i^*) y_i \rightarrow \min_{Y \in \Omega}, \quad (19)$$

где Ω — множество допустимых вариантов построения СБЭ.

Множество допустимых вариантов формируется следующими ограничениями:

$$y_i \in \{0, 1\}; \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^g k_{c_i} P_{\text{ном}_i} y_i = \sum_{i=1}^h k_{c_i} P_{\text{ном}_i}; \quad (21)$$

$$y_i + \sum_{r_i} y_{r_i} = 1, \quad (22)$$

где r_i — номера групп потребителей, в состав которых входит i -й потребитель, $\forall i \in \{1, 2, \dots, h\}$.

Ограничение (20) следует из определения переменных (18). Равенство (21) обеспечивает выполнение условия, при котором нагрузка, подключаемая к СБЭ, равна сумме расчетных активных мощностей ответственных потребителей, а условие (22) позволяет обеспечить подключение каждого ответственного потребителя только к одной системе параллельно работающих ИБП.

Решением математической модели (18)—(22) является вектор, значения элементов которого однозначно определяют оптимальный вариант СБЭ ответственных потребителей:

$$Y^* = \arg \min_{Y \in \Omega} F_\Sigma(Y). \quad (23)$$

СБЭ, построенная в соответствии с решением поставленной задачи, является оптимальной, так как выполняется достаточное условие оптимальности по принципу Беллмана [14].

Фактически задача структурно-параметрической оптимизации представляет собой две последовательно решаемые задачи, относящиеся к классу задач булевой линейной оптимизации, которые являются частным случаем задач дискретной оптимизации.

В задачах дискретного программирования область допустимых решений является невыпуклой и несвязной. Поэтому поиск решения таких задач сопряжен со значительными трудностями. Из-за дискретности допустимого множества многие приемы, разработанные в математическом программировании, неприменимы. Для решения задач дискретной оптимизации приходится использовать специальные методы.

Среди алгоритмических методов, обеспечивающих нахождение точного решения задачи булева программирования, наибольшее распространение получили методы „ветвей и границ“ и метод динамического программирования [15].

Различные методы типа „ветвей и границ“ основаны на последовательном разбиении допустимого множества на подмножества (ветвления) и вычислении оценок (границ), что позволяет исключать подмножества, заведомо не содержащие решения задачи [16]. Алгоритмы, использующие эти методы, реализованы в среде MatLab, где разработана программа [17], скриншот основного окна которой представлен на рис. 4. Основу расчетов программы составляют математический аппарат теории надежности и оптимизации, а также элементы комбинаторики.

Исходные данные

Исходные данные по потребителям

1. Мощности потребителей: 96 22 15 36 23 12 13

2. Коэффициенты спроса: 0.8 1 0.9 1 1 1 1

3. Коэффициенты мощности: 0.8 0.9 0.8 0.85 1 1 0.9

4. Требуемые ВБР: 0.97 0.98 0.97 0.97 0.99 0.99 0.999

Исходные данные по ИБП

Данные по стоимости и номинальный ряд:

5. Ном. мощности: 5 10 20 30 50 60 80 100 120 140 160

6. Стоимости: 2576000 2678000 3096000 4216000 5132000 8465000 9656000

Данные по КПД:

7. Коэффициенты загрузки: 10 20 30 40 50 60 70 80 90

8. КПД: 60 75 80 84 86 88 89 90 90

9. Вероятность безотказной работы: 0.95

10. Макс. количество в параллель: 4

Системные данные

11. Коэффициент запаса по мощности: 1.1

12. Стоимость ээ: 4

Очистить Оптимизировать

РЕЗУЛЬТАТ РЕШЕНИЯ

Оптимальный вариант построения СБЭ

Номера потребителей:	Оптимальный план:		
	Ном. мощность ИБП, кВА	Кол-во основных ИБП, шт.	Кол-во резервных ИБП, шт.
1 4 0 0 0 0 0	80	2	1
2 3 5 6 7 0 0	50	2	2

Критерий оптимальности:

минимум капитальных затрат

минимум годовых приведенных затрат

Годовые приведенные затраты: 4857831 руб./год

Сбросить

Назад Выйти

Рис. 4

Пример решения задачи построения оптимальной СБЭ. Рассмотрим решение задачи построения оптимальной СБЭ на базе ИБП двойного преобразования ($p_{ИБП}=0,95$, $m=4$) для шести ответственных потребителей, при этом значение c_{33} принимается равным 4 руб./(кВт·ч). Исходные данные по потребителям и ИБП сведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

$P_{ном_i}$, кВт	86	22	15	36	23	12
$k_{с_i}$	0,8	1	0,9	1	1	1
$\cos \varphi_i$	0,8	0,9	0,8	0,85	1	1
$P_{тp i}$	0,97	0,98	0,97	0,96	0,99	0,999

Таблица 2

S_j , кВ·А	5	10	20	30	50	60	80	100	120	140	160
c_j , тыс.руб.	1085	1170	1896	2185	2576	2678	3096	4216	5132	8465	9656
κ , %	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
η , %	60	75	80	84	86	88	89	90	90		

Решение поставленной задачи оптимизации найдено с помощью разработанной программы. Результат решения представлен на рис. 5.

Критерий оптимальности	
Минимум капитальных вложений	Минимум приведенных годовых затрат
Значение целевой функции	
18 576 тыс. руб.	4471 тыс. руб./год
Структурная схема оптимальной СБЭ	
Приведенные затраты	Капитальные вложения
4513 тыс. руб./год	18 746 тыс. руб.

Рис. 5

Таким образом, как видно из полученного решения, оптимальный вариант построения СБЭ, найденный в соответствии с критерием минимума капитальных затрат, является менее капиталоемким, но требует большего объема приведенных затрат, чем вариант, обеспечивающий их минимум. При этом оба варианта гарантируют требуемый уровень надежности.

Заключение. Представленные математические модели задачи структурно-параметрической оптимизации системы бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей, с одной стороны, позволяют учесть наиболее важные показатели эффективности СБЭ, в том числе и эксплуатационные расходы, а с другой — позволяют решать эту задачу как задачу дискретного программирования. Использование математических моделей при создании (реконструкции) СБЭ гарантирует выбор оптимального по какому-либо экономическому критерию варианта построения СБЭ, удовлетворяющего требованиям по надежности, а разработанная программа позволяет найти решение оптимизационной задачи, обеспечивая при этом удобство ввода исходных данных, высокую скорость решения и наглядное представление результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике / *Н. И. Воронай, Г. Ф. Ковалев, Ю. Н. Кучеров* и др. М.: ИД „Энергия“, 2013. 212 с.
2. *Карагодин В. В., Полянский К. А., Зверев А. В.* Подходы к обеспечению электроснабжения ответственных потребителей специального объекта с заданным уровнем надежности // Сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. „Теоретические и прикладные проблемы развития систем внутреннего и автономного электроснабжения специальных объектов“. М., 2015. С. 113—119.
3. *Герасимов А. Н., Орлов А. В., Петрушин В. Ф.* Системы бесперебойного электроснабжения: Учеб. пособие. СПб: МО РФ, 1997. 203 с.
4. *Коттули К.* Сравнение статических и динамических ИБП // Schneider Electric. Прил. Информационные статьи. 2011. № 92. 17 с.
5. *Леута А. А., Равин Б. Ц.* Статические преобразователи как альтернатива электромашиным преобразователям в системах электропитания // Электрическое питание. 2005. № 3. С. 65—66.
6. *Карагодин В. В., Рудой Е. М., Полянский К. А., Морозов С. В.* Анализ задачи обеспечения электроснабжения ответственных потребителей с заданным уровнем надежности // Вестн. Академии инженерных наук (СПБО АИН). 2015. Вып. № 11. С. 162—171.
7. *Григораш О. В., Богатырев Н. И., Курзин Н. Н., Казаков Д. А.* Математический аппарат для оценки эффективности систем гарантированного электроснабжения: Монография. Краснодар, 2002. 285 с.
8. *Карагодин В. В., Полянский К. А.* Задача оптимизации структуры системы бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей объектов Министерства обороны // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12, № 1. С. 20—27.
9. *Аполлонский С. М., Куклев Ю. В.* Надежность и эффективность электрических аппаратов. СПб: Изд-во „Лань“, 2011. 448 с.
10. *Карагодин В. В., Пешехонов Н. Е.* Проектирование систем электроснабжения зданий и сооружений объектов МО: Учеб.-метод. пособие. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. 252 с.
11. *Аббасова Т. С.* Энергетическая эффективность систем электропитания для высокоскоростных телекоммуникационных систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т. 5, № 2. С. 3—7.
12. *Расмуссен Н.* Моделирование эффективности энергопотребления в центрах обработки данных // Журн. сетевых решений/LAN. 2007. № 11. С. 40—47.
13. *Сеньченков В. И.* Статистические методы обработки экспериментальных данных. СПб: ГУАП, 2006. 244 с.
14. *Беллман Р., Дрейфус С.* Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука, 1965. 459 с.
15. *Леоненков А. В.* Решение задач оптимизации в среде MS Excel. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 704 с.
16. *Сухарев А. Г., Тимохов А. В., Федоров В. В.* Курс методов оптимизации. М.: Наука, 1986. 328 с.
17. *Полянский К. А., Карагодин В. В., Горин В. А.* Программа для ЭВМ „Программа определения оптимального варианта построения СБЭ“: Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ, № 2016619582 от 24.08.2016 г.

Сведения об авторах

- Владимир Викторович Карагодин** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра энергоснабжения объектов наземной космической инфраструктуры; E-mail: vladimirkar@rambler.ru
- Константин Аркадьевич Полянский** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра энергоснабжения объектов наземной космической инфраструктуры; E-mail: kostyapol2007@rambler.ru
- Горин Вадим Александрович** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; начальник лаборатории Военного института; E-mail: vadim044542010@mail.ru

Рекомендована кафедрой
энергоснабжения объектов наземной
космической инфраструктуры

Поступила в редакцию
21.06.16 г.

Ссылка для цитирования: Карагодин В. В., Полянский К. А., Горин В. А. Структурно-параметрическая оптимизация системы бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 1. С. 14—24.

STRUCTURAL-PARAMETRIC OPTIMIZATION OF UNINTERRUPTIBLE SYSTEM FOR POWER SUPPLY OF RESPONSIBLE CONSUMERS

V. V. Karagodin, K. A. Polyansky, V. A. Gorin

A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: vladimirkar@rambler.ru

The problem of structural-parametric optimization of system for uninterruptible power supply of responsible consumers is considered. Mathematical models of the problem are developed. An economic criterion (minimization of capital investment or the annual cost) is taken for the optimality criterion, while required level of power supply system reliability with the account for redundancy of the uninterruptible sources is considered as the constraints. The dependence of the efficiency coefficient for parallel-working static uninterruptible power supply units from their load is investigated. Based on analysis of methods of discrete optimization problem solution, the method of "branches and limits" is justified. A developed computer program for solution of the problem is presented. As an example, the problem of the structural and the parametric optimization of the uninterruptible power supply system for specific initial conditions is considered.

Keywords: optimization, uninterrupted power supply system, responsible consumer, discounted costs, capital inputs, electric reliability

Data on authors

- Vladimir V. Karagodin** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Power Supply of Objects of Ground Space Infrastructure; E-mail: vladimirkar@rambler.ru
- Konstantin A. Polyansky** — Adjunct; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Power Supply of Objects of Ground Space Infrastructure; E-mail: kostyapol2007@rambler.ru
- Vadim A. Gorin** — PhD; A. F. Mozhaysky Military Space Academy; Head of Research Laboratory; E-mail: vadim044542010@mail.ru

For citation: Karagodin V. V., Polyansky K. A., Gorin V. A. Structural-parametric optimization of uninterruptible system for power supply of responsible consumers // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2017. Vol. 60, N 1. P. 14—24 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-14-24