



Карагодин В.В.
Karagodin V.V.

доктор технических наук,
профессор кафедры «Энергоснабжение
(наземной космической инфраструктуры)»
ФГККВО ВО «Военно-космическая академия име-
ни А.Ф. Можайского» МО РФ,
Россия, г. Санкт-Петербург;



Полянский К.А.
Polyanskiy K.A.

адъюнкт кафедры «Энергоснабжение
(наземной космической инфраструктуры)»
ФГККВО ВО «Военно-космическая академия име-
ни А.Ф. Можайского» МО РФ,
Россия, г. Санкт-Петербург.

УДК 621.311.44

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ

Современные тенденции развития технологических и технических систем вооружения объектов Министерства обороны Российской Федерации (МО РФ) обуславливают повышенные требования к надежности электроснабжения ответственных потребителей и качеству электроэнергии во всех режимах их работы. В настоящее время для обеспечения данных требований наиболее часто используются системы бесперебойного электроснабжения (СБЭ), выполняемые на базе статических источников бесперебойного питания (ИБП), имеющих ряд преимуществ по сравнению с системами, выполненными на базе динамических ИБП. В зависимости от требований к бесперебойности и качеству электроснабжения, количества и мощности потребителей, условий размещения основного оборудования СБЭ и других факторов, построение систем бесперебойного электроснабжения может производиться по различным схемам. В статье рассмотрены постановка и концептуальная модель задачи оптимизации структуры и параметров СБЭ ответственных потребителей, на основе которых сформулирована математическая постановка рассматриваемой задачи. При построении математической модели задачи оптимизации СБЭ учитываются два главных показателя эффективности: в качестве экономического показателя – капитальные затраты, т.е. затраты на приобретение оборудования СБЭ, и в качестве показателя надежности – вероятность безотказной работы. Задача оптимизации структуры и параметров СБЭ сведена к однокритериальной оптимизационной задаче, в которой в качестве критерия оптимальности принят экономический критерий. Требуемый уровень надежности электроснабжения с учетом возможности резервирования ИБП учитывается в виде ограничения. Определен порядок расчета вероятности безотказной работы СБЭ с некоторой кратностью резервирования. Введены и определены переменные, фиксированные значения которых определяют отдельное решение задачи, целевая функция, представляющая собой суммарные капитальные затраты на построение СБЭ всех ответственных потребителей и/или групп этих потребителей, и набор ограничивающих условий. Целевая функция предполагается линейной относительно своих переменных. Переменные являются булевыми переменными, а данная математическая модель относится к классу линейных булевых математических моделей. На основе анализа методов решения задач дискретной оптимизации

обосновано применение метода «ветвей и границ», алгоритм которого реализован в программе MS Excel 2010. В качестве примера рассмотрено решение задачи выбора оптимального варианта построения СБЭ на базе ИБП для конкретных начальных условий. Решение поставленной в статье задачи позволит выбрать оптимальный по капиталовложениям вариант построения системы бесперебойного питания, обеспечивающий требуемый уровень надежности электроснабжения ответственных потребителей.

Ключевые слова: оптимизация, система бесперебойного электроснабжения, надежность электроснабжения, ответственный потребитель, вариант построения.

THE PROBLEM OF THE STRUCTURE OPTIMIZATION OF AN UNINTERRUPTED POWER SUPPLY SYSTEM OF THE RESPONSIBLE CONSUMERS OF THE OBJECTS OF THE DEPARTMENT OF DEFENSE

Modern trends in the development of technological and technical systems of armaments of the Department of defense of the Russian Federation (RF) cause increased requirements to the reliability of a power supply of the responsible consumers and the quality of electricity in all modes of their operation. Now to ensure these requirements are most commonly used the uninterruptible power supply system (UPSS) performed on the base of the source of uninterruptible power supply (SUPS) having a number of advantages if compared it with the systems based on dynamic the UPSS. According on the requirements of the uninterrupted operation and the quality of a power supply, the volume and the capacity of consumers, the location conditions of the main equipment of the UPSS and other factors, the construction of the uninterrupted power supply systems can be performed through various plans. The article deals with the definition and conceptual model of the optimization problem of the structure and the parameters of the UPSS of the responsible consumers, on the basis of which the mathematical statement of the considered problem was formulated. In constructing mathematical model of optimization problem the UPSS takes into account two main indicators of the efficiency: as an economic indicator – a capital cost, that is the costs of the purchasing equipment, the UPSS, and as a measure of the reliability – the probability of an failure-free operation. The problem of the optimization of the structure and the parameters of the UPSS reduced to the single-criterion optimization problem, in which as the optimality criterion adopted the economic criteria. The required level of the reliability of the power supply taking into account the possibility of redundancy of the SUPS is accounted for in the form of the restriction. Defined the procedure of calculating the probability of failure-free operation of the UPSS with a given multiplicity of a redundancy. Introduced and defined variables, fixed values which define the individual solution of the problem, the objective function representing a total capital cost of the construction of the UPSS all responsible consumers and/or groups of such consumers, and a set of the limiting conditions. The objective function is assumed linear relationally to its variables. The variables are the Boolean variables, and this mathematical model belongs to the class of the linear Boolean mathematical models. Based on the analysis of the methods for solving the task of discrete optimization is proved through using the method of "branches and limits" algorithm of which is realized in MS Excel 2010. As an example, consider the decision of the problem of choosing an optimal variant of the UPSS construction based on the SUPS for specific initial conditions. The solution of the problem will allow choosing the optimal for the capital investment option of the building the uninterruptible power supply system, providing required level of the reliability of a power supply of the responsible consumers.

Keywords: optimization, uninterruptible power supply system, power supply reliability, the responsible consumer, the option of constructing.

Введение.

Большинство ответственных потребителей наземных комплексов (НК) объектов Министерства обороны Российской Федерации, обеспечивающих применение

вооружения по предназначению, для своей нормальной работы требуют не только высокой надежности и бесперебойности электроснабжения, но и высокого качества электроэнергии во всех режимах работы.

Нерешенность в настоящее время проблемы обеспечения надежности в электроэнергетике РФ [1] (системы внешнего электроснабжения не гарантируют требуемой надежности электроснабжения) приводит к существенному возрастанию роли систем бесперебойного и гарантированного электроснабжения в обеспечении требуемого уровня надежности электроснабжения и качества электроэнергии [2].

Основным функциональным элементом СБЭ является источник бесперебойного питания (ИБП). СБЭ могут выполняться как на базе статических ИБП (двойного преобразования), так и на базе динамических ИБП (дизель-роторные, гибридные, маховичные).

Выбор ИБП двойного преобразования для построения СБЭ, рассматриваемых в статье, обусловлен рядом их преимуществ по сравнению с динамическими [3], прежде всего, по показателям надежности и времени необслуживаемой работы, а также они имеют более высокий КПД в типичном режиме работы (при нагрузке менее 80% от номинальной мощности); широкий диапазон поддерживаемой нагрузки; масштабируемость и ряд других преимуществ.

Постановка задачи и разработка концептуальной модели. В зависимости от требований к бесперебойности и качеству электроснабжения, количества и мощности потребителей, условий размещения основного оборудования СБЭ и других факторов, построение систем бесперебойного электроснабжения может производиться по различным схемам, обеспечивающих генерирование требуемой электроэнергии. Очевидно, что в этом случае из большого числа возможных структур систем электроснабжения всегда возможно отобрать структуры СБЭ, имеющие лучшие, в сравнении с другими техническими решениями показатели эффективности (массогабаритные и энергетические показатели, показатели надежности, качества электроэнергии и стоимости).

Большая номенклатура и широкий ряд номинальных мощностей ИБП двойного преобразования, возможность резервирования ИБП, нелинейный (как правило, экспоненциальный) характер зависимости стоимости данных устройств от их номинальной мощности свидетельствуют о том, что задача построения СБЭ на базе ИБП двойного преобразования может быть сведена к оптимизационной задаче по какому-либо одному или нескольким критериям.

Оптимизация структуры и параметров СБЭ ответственных потребителей может осуществляться по различным показателям эффективности, к

которым можно отнести экономические показатели, показатели надежности, энергетические показатели, конструктивные показатели и др.

Наиболее часто задача оптимизации СБЭ сводится к отысканию минимума приведенных затрат на их создание. Для систем электроснабжения наземных комплексов объектов МО РФ доминирующее значение по сравнению с их экономическими показателями имеют технические показатели, обеспечивающие соответствующие назначению объекта надежность и живучесть. Однако оптимальным следует считать такой вариант СБЭ, который, обеспечивая заданные технические показатели, имеет к тому же и наилучшие экономические показатели.

Учитывая данное обстоятельство, при построении математической модели задачи оптимизации СБЭ будем учитывать два главных показателя эффективности: в качестве экономического показателя – капитальные затраты, т.е. затраты на приобретение оборудования СБЭ, и в качестве показателя надежности – вероятность безотказной работы. В этом случае возможны два варианта постановки однокритериальной оптимизационной задачи.

Первый вариант – при заданном ограничении $Z_{зад}$ на капитальные затраты $Z(X)$ на приобретение ИБП для СБЭ максимизировать надежность системы (вероятность безотказной работы) $P(X)$ на дискретном (конечном или счетном) множестве D вариантов построения СБЭ, имеющих различные показатели надежности и стоимости

$$\begin{cases} P(X) \rightarrow \max; \\ Z(X) \leq Z_{зад}. \end{cases}$$

где X – n -мерный векторный аргумент, $X \in D$.

Второй вариант – минимизировать капитальные затраты $Z(X)$ на приобретение ИБП для СБЭ при заданном ограничении $P_{треб}$ на показатель безотказности ее функционирования $P(X)$

$$\begin{cases} Z(X) \rightarrow \min; \\ P(X) \geq P_{треб}. \end{cases}$$

В статье ограничимся рассмотрением второго варианта постановки задачи оптимизации структуры СБЭ, в котором в качестве критерия оптимальности принят экономический критерий.

Математическая постановка задачи оптимизации структуры СБЭ. При построении математической модели рассматриваемой задачи оптимизации будем учитывать ряд *допущений*:

- капитальные затраты на построение СБЭ равны сумме стоимостей ИБП, входящих в ее состав;
- возможна параллельная работа ИБП одинаковой номинальной мощности. Средствами объединения «в параллель» оснащены ИБП всего ряда номинальных мощностей;
- допускается объединение одиночных ответственных потребителей в отдельные группы.

При математической постановке задачи оптимизации должны быть определены переменные, фиксированные значения которых определяют отдельное решение задачи, целевая функция, представляющая собой математическую запись критерия оптимальности, и набор ограничивающих условий.

Введем в рассмотрение следующие *переменные*:

$$x_{ijn} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ый потребитель (группа) запитан} \\ & \text{от группы из } n \text{ параллельно работающих} \\ & \text{основных ИБП } j\text{-ой номинальной мощности;} \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$x'_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ый потребитель (группа) запитан} \\ & \text{от группы из } k \text{ параллельно работающих} \\ & \text{резервных ИБП } j\text{-ой номинальной мощности;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Переменные являются булевыми переменными: $x_{ijn}, x'_{ijk} \in B$.

$$Z = \sum_{i=1}^g Z_i = \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^l \left[c_j \left[\sum_{n=1}^m n x_{ijn} + \sum_{k=1}^{m-1} k x'_{ijk} \right] \right] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где: Z_i – капитальные затраты на построение СБЭ для питания i -го потребителя (группы), руб.; g – общее количество одиночных потребителей (h) и отдельных групп потребителей (s), $g = s + h$;

$s = \sum_{i=2}^h c_h^i$ – количество возможных вариантов объединения h одиночных потребителей в отдельные группы; l – номер ИБП максимальной номинальной мощности; C_j – стоимость ИБП j -ой номинальной

мощности, руб.; $\sum_{n=1}^m n x_{ijn}, \sum_{k=1}^{m-1} k x'_{ijk}$ – суммарное количество основных и резервных ИБП j -ой номинальной мощности для питания i -го потребителя (группы потребителей) соответственно; m – максимальное количество ИБП, включаемых на параллельную работу (в соответствии с техническими характеристиками); n – количество основных ИБП; k – количество резервных ИБП.

Множество допустимых альтернатив (вариантов построения) формируется следующей системой *ограничений*:

а) переменные могут принимать только одно из двух значений:

$$x_{ijn}, x'_{ijk} = \{0, 1\} \quad (2)$$

где: $i \in 1, 2, \dots, h, \dots, g$; $n \in 1, 2, \dots, m$; $j \in 1, 2, \dots, m$; $k \in 1, 2, \dots, m-1$;

б) ответственные потребители должны быть обеспечены электроэнергией в заданном количестве. Причем для обеспечения устойчивой работы ответственных потребителей необходимо, чтобы номинальная мощность СБЭ была больше требуемой на 10...20%.

$$\sum_{j=1}^l \sum_{n=1}^m n S_j x_{ijn} \geq k_s S_i \quad (3)$$

где: S_i – установленная мощность i -го потребителя (группы), кВА; S_j – номинальная мощность j -го ИБП, кВА; k_3 – коэффициент запаса;

$$\sum_{j=1}^l \sum_{n=1}^m x_{ijn} \leq 1, \sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^{m-1} x'_{ijk} \leq 1 \quad (4)$$

в) в оптимальное решение должен входить только один вариант электроснабжения каждого потребителя;

$$P_{СБЭ}(X) \geq P_{треб} \quad (5)$$

г) значение вероятности безотказной работы СБЭ не должно быть ниже значения требуемой вероятности безотказной работы.

Вероятность безотказного функционирования СБЭ определяется в первую очередь вероятностью безотказной работы ИБП и кратностью резервирования ИБП, для осуществления которого может быть использован структурный вид резервирования с постоянно включенным и нагруженным режимом работы резерва (рис. 1).

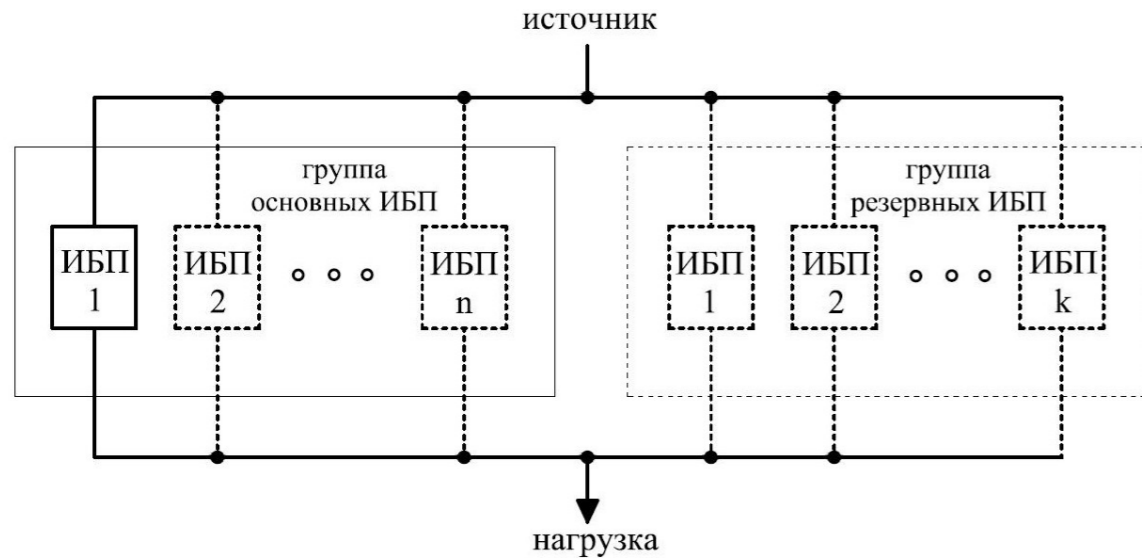


Рис. 1. Резервирование ИБП с дробной кратностью при нагруженном резерве

Современные ИБП допускают резервирование с дробной кратностью, что позволяет снизить стоимость СБЭ. Кратность резервирования определяется из соотношения [6]:

$$r = \frac{n}{k} = \frac{z - k}{k} \quad (6)$$

где: $z = n + k$ – общее количество ИБП.

Значение вероятности безотказной работы СБЭ с кратностью r при допущении, что выбранные ИБП равнонадежны, определяется по формуле [4]:

$$P_{СБЭ}(t) = \sum_{i=0}^{i=k} C_z^i [Q_{ИБП}(t)]^i [P_{ИБП}(t)]^{z-i} = \sum_{i=0}^{i=k} C_z^i [1 - P_{ИБП}(t)]^i [P_{ИБП}(t)]^{z-i} \quad (7)$$

где: $Q_{ИБП}(t)$ – вероятность отказа одного ИБП; $P_{ИБП}(t)$ – вероятность безотказной работы одного ИБП; C_z^i – число различных вариантов,

$$C_z^i = \frac{z!}{i!(z-i)!} = \frac{(n+k)!}{i!(n+k-i)!} \quad (8)$$

Учитывая изложенное выше, ограничение (5) может быть записано следующим образом:

$$x_{ijn} \Delta P_n + \sum_{k=1}^{m-n} x'_{ijn} \Delta P_{n/k} \geq 0, \quad (9)$$

где: $\Delta P_n = P_{n/0} - P_{треб}$ – разность между значением вероятности безотказной работы системы из n основных агрегатов без резерва и значением требуемой вероятности безотказной работы; $\Delta P_{n/k} = P_{n/k} - P_{n/0}$ – разность между значениями

вероятности безотказной работы системы, состоящей из n основных и k резервных агрегатов, и системы, не имеющей резервных агрегатов.

В общем виде решение задачи оптимизации структуры СБЭ (1), ..., (4), (9) может быть представлено следующим образом:

$$X^* = \arg \min_{X \in D} Z(X).$$

Обоснование метода решения. Полученная математическая модель относится к классу линейных булевых математических моделей. Задачи булевой линейной оптимизации являются частным случаем задач дискретной оптимизации. В задачах дискретного программирования область допустимых решений является невыпуклой и несвязной. Поэтому отыскание решения таких задач сопряжено со значительными трудностями. Из-за дискретности допустимого множества неприменимы многие приемы, разработанные в математическом программировании. Для решения задач дискретной оптимизации приходится использовать специальные методы. Из алгоритмических методов, обеспечивающих нахождение точного решения задачи булева программирования, наибольшее распространение получили методы типа «ветвей и границ» и динамического программирования [5].

Различные методы типа «ветвей и границ» основаны на последовательном разбиении допустимого множества на подмножества (ветвления) и вычислении оценок (границ), позволяющем отбрасывать подмножества, заведомо не содержащие решений задачи. Алгоритмы, использующие эти методы, реализованы в программе MS Excel 2010, с помощью которой была успешно решена сформулированная задача оптимизации структуры СБЭ для различных исходных данных.

Пример решения оптимизационной задачи.

В качестве примера рассмотрим решение задачи выбора оптимального варианта построения на базе ИБП СБЭ двух ответственных потребителей мощностью $S_1=70$ кВА и $S_2=45$ кВА. При этом будем считать $P_{треб} = 0.99$, $P_{ИБП} = 0.98$, $k_3 = 1.1$. Данные по ИБП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Номинальные мощности и стоимости ИБП серии GP (ОАО «Инвертор»)

S_j , кВА	5	10	20	30	50	60
C_j , руб.	1 084 915	1 170 187	1 895 689	2 185 018	2 575 944	2 677 669
S_j , кВА	80	100	120	140	160	
C_j , руб.	3 096 429	4 216 013	5 132 366	8 464 798	9 656 264	

Математическая постановка задачи:

$$Z = \sum_{i=1}^3 Z_i = \sum_{j=1}^{11} \left[c_j \left[\sum_{n=1}^4 n x_{ijn} + \sum_{k=1}^3 k x'_{ijk} \right] \right] \rightarrow \min_{X \in D}$$

Множество допустимых вариантов построения СБЭ формируется следующей системой ограничений типа неравенств:

$$1) x_{ijn}, x'_{ijk} = \{0; 1\}; 2) \sum_{j=1}^{11} \sum_{n=1}^4 n S_j x_{ijn} \geq 1, 1 S_i; 3) \sum_{j=1}^{11} \sum_{n=1}^4 x_{ijn} \leq 1, \sum_{j=1}^{11} \sum_{k=1}^3 x'_{ijk} \leq 1;$$

$$4) \begin{cases} n = 1: x_{ij1}(P_{убн} - P_{мреб}) + x'_{ij1}(P_{убн} - P_{убн}^2) + x'_{ij2}(P_{убн}^3 + 2P_{убн} - 3P_{убн}^2) + x'_{ij3}(3P_{убн} + 4P_{убн}^3 - 6P_{убн}^2 - P_{убн}^4) \geq 0; \\ n = 2: x_{ij2}(P_{убн}^2 - P_{мреб}) + x'_{ij1}(2P_{убн}^2 - 2P_{убн}^3) + x'_{ij2}(5P_{убн}^2 - 3P_{убн}^4 - 8P_{убн}^3) \geq 0; \\ n = 3: x_{ij3}(P_{убн}^3 - P_{мреб}) + x'_{ij1}(3P_{убн}^3 - 3P_{убн}^4) \geq 0; \\ n = 4: x_{ij4}(P_{убн}^4 - P_{мреб}) \geq 0. \end{cases}$$

Система уравнений для последнего ограничения получена путем записи расчетных формул для вычисления вероятности безотказной работы СБЭ при всех возможных кратностях резервирования и подстановки их в выражение (9), учитывая при этом возможность параллельной работы до четырех ИБП ($m=4$).

Решение поставленной задачи оптимизации найдено с помощью программы MS Excel и пред-

ставлено в виде таблицы (табл. 2).

Таким образом, из полученного решения следует то, что оптимальным вариантом, обеспечивающим минимум капитальных вложений и необходимый уровень надежности, является вариант построения №2 с объединением потребителей и установкой двух основных и одного резервного ИБП номинальной мощностью 80 кВА.

Таблица 2

Результат решения примера задачи оптимизации СБЭ

Целевая функция		
$Z = \sum_{i=1}^g Z_i = \sum_{j=1}^l \left[c_j \left[\sum_{n=1}^m n x_{ijn} + \sum_{k=1}^{m-1} k x'_{ijk} \right] \right] \rightarrow \min$		20 643 035
Z _i , руб.		
i=1	i=2	i=3 (g=3: S3=S1+S2)
6 192 858	5 151 890	9 298 287
Вариант построения (стоимость)		
1 (11 344 748 руб.)		2 (9 298 287 руб.)

Заключение. Как правило, построение СБЭ ответственных потребителей объектов МО РФ ведется путем рассмотрения небольшого количества отдельных вариантов, выбираемых из множества возможных, зачастую на основе личного опыта лица, принимающего решения. Но усложнение структуры

СБЭ и удорожание ее элементов говорят о необходимости создания эффективной методики обоснованного выбора оптимального (рационального) варианта построения СБЭ. Создание такой методики возможно на основе поставленной в данной статье задачи оптимизации.

Список литературы

1. Воропай Н.И. Концепция обеспечения надёжности в электроэнергетике [Текст] / Н.И. Воропай, Г.Ф. Ковалёв, Ю.Н. Кучеров [и др.]. – М.: ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. – 212 с.
2. Герасимов А.Н. Системы бесперебойного электроснабжения: учебное пособие [Текст] / А.Н. Герасимов, А.В. Орлов, В.Ф. Петрушин:– СПб.: Министерство обороны РФ, 1997. – 203 с.
3. Коттули К. Сравнение статических и динамических ИБП [Текст] / К. Коттули // Информационные статьи Schneider Electric.– 2011. – № 92.– 17 с.
4. Аполлонский С.М. Надежность и эффективность электрических аппаратов [Текст] / С.М. Аполлонский, Ю.В. Куклев. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 448 с.
5. Леоненков А.В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel [Текст] / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 704 с.

References

1. Voropaj N.I. Konceptcija obespechenija nadjozhnosti v jelektrojenergetike [Tekst] / N.I. Voropaj, G.F. Kovaljov, Ju.N. Kucherov [i dr.]. – M.: ООО ID «JeNERGIJa», 2013. – 212 p.
2. Gerasimov A.N. Sistemy besperebojnogo jelektrosnabzhenija: uchebnoe posobie [Tekst] / A.N. Gerasimov, A.V. Orlov, V.F. Petrushin:– SPb.: Ministerstvo Oborony RF, 1997. – 203 p.
3. Kottuli K. Sravnienie staticheskikh i dinami-cheskikh IBP [Tekst] / K. Kottuli // Informacionnye stat'i Schneider Electric. – 2011. – № 92. – 17 p.
4. Apollonskij S.M. Nadezhnost' i jeffektivnost' jelektricheskikh apparatov [Tekst] / S.M. Apollonskij, Ju.V. Kuklev. – SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2011. – 448 p.
5. Leonenkov A.V. Reshenie zadach optimizacii v srede MS Excel [Tekst] / A.V. Leonenkov. – SPb.: BHV-Peterburg, 2005. – 704 p.