

УДК 621.3

**Квашнина Галина Владимировна**

ФГОБУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»

Россия, Липецк<sup>1</sup>

Ассистент кафедры электрооборудования

[g.v.kvashnina@ya.ru](mailto:g.v.kvashnina@ya.ru)

## **Повышение безотказности электроснабжения временным резервированием при включении в цепь емкостного накопителя**

**Аннотация.** Современные системы электроснабжения представляют собой сложные иерархические системы. Обеспечение качества и надёжности их структур является основной задачей и в то же время одной из важнейших проблем, возникающих при построении и в процессе эксплуатации любой электротехнической системы. Существующие методы обеспечения безотказности систем электроснабжения предусматривают введение избыточных мощностей. Однако это ведет к росту объёмов энергопотребления и эксплуатационных расходов. В связи с этим с целью повышения безотказности электроснабжения предлагается использовать временную избыточность.

В данной работе описание взаимодействия элементов электрической системы в условиях временной избыточности выполняется на основе математического аппарата теории случайных импульсных потоков. Приведён пример расчета изменения параметров схемы электроснабжения с установкой в ней электрического накопителя. Проанализировано соответствие расчетных и теоретических параметров; дана оценка соответствия полученных результатов технологически необходимым.

Полученные результаты позволяют отследить изменение влияния временной избыточности на безотказность электроснабжения потребителя при различных параметрах системы, используемого накопителя и длительностях отказов. Выявлено, что применение временной избыточности значительно снижает риск возникновения отказов в системах электроснабжения.

**Ключевые слова:** система электроснабжения; резервирование; временная избыточность; резервный источник; накопитель; время разряда накопителя; безотказность; резервирование замещением; энергоэффективность; теория случайных импульсных потоков.

---

<sup>1</sup>398600, Липецк, Московская, 30

Известно, что одной из основных задач электроснабжения объектов является оптимизация технических решений по обеспечению надежности при проектировании, создании и эксплуатации электротехнического оборудования, установок и систем. Распространённым способом повышения надёжности является структурное резервирование [1,2] либо введение резервных мощностей. Последнее, в отсутствие высокоэффективных технологий, с учетом высокой актуальности снижения электропотребления, вызывает противоречие между требованием к снижению эксплуатационных расходов на содержание и покупку резервного оборудования и требованием к обеспечению безаварийности эксплуатации.

Работы, выполненные нами ранее [3-6], показали, что одним из путей снижения эксплуатационных расходов при одновременном сохранении безаварийности работы является создание для объекта электроснабжения запаса времени необходимого либо для возобновление прерванного в результате отказа функционирования системы электроснабжения, либо для выполнения технологических функций объекта в случае отказа в работоспособности основной питающей линии. Резервирование времени в этом случае может быть достигнуто последовательным или параллельным подключением аккумуляторов, мощность и ресурс которых зависят от эксплуатационных параметров резервируемой схемы [1].

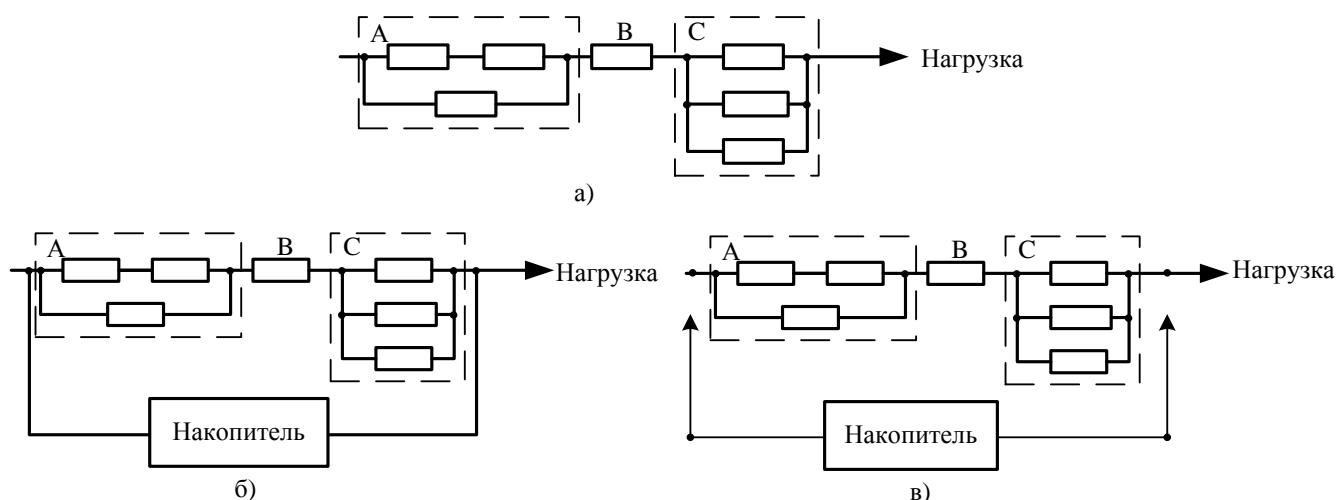
Техническое решение, направленное на повышение надежности последовательным подключением нескольких аккумуляторов обладает рядом недостатков. Одним из которых является продолжительная работа резервного источника питания в режиме холостого хода, что сопровождается снижением энергоэффективности. Кроме того, данный тип соединения снижает вероятность безотказного функционирования системы, т.к. при последовательном соединении отказ одного из элементов ведёт к отказу всей цепи,

$$P_{\Sigma\text{посл}} = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

где:  $P_{\Sigma\text{посл}}$  – общая вероятность работы системы;  $P_i$  – вероятность работы элемента;  $n$  - число последовательно соединенных элементов.

При этом всегда будем иметь, что  $P_{\Sigma\text{посл}} \leq P_{\text{imin}}$ .

В настоящей работе рассмотрим техническое решение, направленное на реализацию временного замещения параллельным подключением парциального накопителя. В общем случае представим модель надежности резервируемой схемы в виде смешанного соединения элементов, обеспечивающих питание потребителя (на рис. 1 условно не показан). Принимаем известными время наработки на отказ каждой ветви блоков смешанного соединения А и С; время восстановления каждого элемента и вероятность работы элементов В и D.



**Рис. 1.** Структурная схема расчетной системы электроснабжения:  
а) до введения избыточности; б) постоянное резервирование; в) резервирование замещением  
(разработано автором)

Описание взаимодействия элементов электрической системы в условиях временной избыточности выполним на основе математического аппарата теории случайных импульсных потоков [7,8]. Будем считать, что в системах с временным резервированием отказы оборудования, длительностью меньше времени полного разряда накопителя  $t_n$ , не оказывают влияния на работу системы. В этом приближении значимыми можно считать отказы, длительность которых превышает время разряда накопителя [9]. Вероятность их появления при экспоненциальном законе распределения времени восстановления системы можно оценить согласно:

$$\bar{p}_{ви} = \bar{\mu}_{ви} \int_{t_n}^{\infty} \theta_{ви} \beta_{ви}(\theta) d\theta, \quad (2)$$

где  $\bar{\mu}_{ви}$  и  $\beta_{ви}(\theta)$  – средняя частота и плотность вероятности распределения длительности не поступления заряда в накопитель, соответствующие отказам оборудования, подвергшегося временному резервированию;  $\theta_{ви}$  – длительность времени восстановления при наличии временного резервирования.

Тогда изменение вероятности отказа резервируемой системы удобно оценить:

$$\Delta p = (p_{ви} - p) / p_{ви} \times 100\% \quad (3)$$

где  $p$  и  $p_{ви}$  – вероятность работы системы без временной избыточности и с её использованием соответственно.

Расчет изменения безотказности системы при установке накопителя рассмотрим для двух случаев: для постоянного резервирования (рис. 1, б), когда основная и резервная цепи осуществляют работу одновременно (нагруженный резерв), но в нормальном режиме используется только основная цепь; резервирования замещением (рис. 1, в), когда накопитель подключается в случае отказа основной цепи вручную или автоматически.

В расчетах принимаем, что вероятность работы накопителя остаётся постоянной и равна  $p_n = 0,95$ , а вероятность составляющих систему элементов изменяется от  $p_{эл} = 0,95$  до  $p_{эл} = 0,8$ . Будем считать, что переключение осуществляется с помощью

«идеальных» переключателей (т.е. вероятность безотказной работы переключателя равна единице), а резерв является нагруженным. Тогда при постоянном резервировании вероятность безотказной работы системы удобно определить согласно [10]:

$$P_{\text{пост}} = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов системы,  $t$  – наработка на отказ,  $n$  – кратность резервирования,  $n=2$ .

При резервировании замещением в случае, если интенсивность отказов основной цепи и резервного элемента различны,

$$P_{\text{замещ}} = e^{-\lambda t} + \frac{\lambda}{\lambda_n - \lambda} (e^{-\lambda t} - e^{-\lambda_n t}), \quad (5)$$

где  $\lambda_n$  – интенсивность отказов накопителя.

Если же интенсивности отказов одинаковы, то

$$P_{\text{замещ}} = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t). \quad (6)$$

Изменение вероятности работы системы при введении в нее накопителя соответствует данным, приведенным в таблице 1.

Видно, что риск возникновения отказа при установке накопителя в рассматриваемой системе электроснабжения значительным образом зависит от надежности элементов резервируемой схемы электроснабжения. При снижении надежности составляющих схемы электропитания влияние резервирования также увеличивается, и при снижении вероятности работы элементов до уровня 0,8 (при тех же параметрах накопителя) вероятность отказа в рассматриваемой схеме уменьшается почти вдвое. При этом наибольшая эффективность от использования резервного накопителя наблюдается при увеличении длительности наработки системы. Это же справедливо и для резервирования замещением. Однако следует отметить, что при малых наработках, резервирование замещением является более эффективным, чем постоянное резервирование.

**Таблица 1**

**Влияние временного резерва на изменение надежности работы системы относительно системы, не оснащенной резервным элементом**

Изменение вероятности работы системы относительно системы без резерва, %				
средняя наработка на отказ системы $\bar{\tau}$	постоянное резервирование, $p_n=0,95$		резервирование замещением, $p_n=0,95$	
	$p_{эл}=0,95$	$p_{эл}=0,8$	$p_{эл}=0,95$	$p_{эл}=0,8$
$1,5\bar{\tau}_{осн}^*$	17,2	51,9	17,6	52,5
$3\bar{\tau}_{осн}$	31,5	77,2	32,1	77,6
$4,5\bar{\tau}_{осн}$	43,4	89,3	44,0	89,5
$6\bar{\tau}_{осн}$	53,3	94,9	54,0	95,0
$7,5\bar{\tau}_{осн}$	61,5	97,6	62,1	97,7
$9\bar{\tau}_{осн}$	68,3	98,9	68,8	98,9
$10,5\bar{\tau}_{осн}$	73,9	99,5	74,3	99,5
$12\bar{\tau}_{осн}$	78,5	99,8	78,9	99,8

(разработано автором)

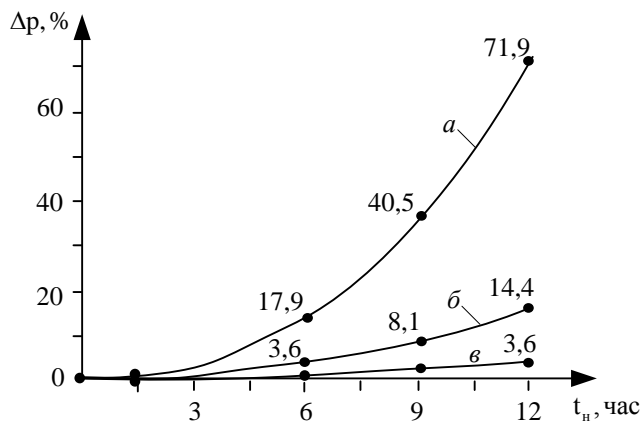
\* - средняя наработка на отказ основной цепи

Рассмотрим взаимосвязь объема накопителя с повышением вероятности работы системы. Принимаем [4], что

$$\Delta\bar{p} = \bar{\mu}_{\text{зо}} \int_0^{t_n} \theta_{\text{зо}} \beta_{\text{зо}}(\theta) d\theta, \quad (7)$$

где  $\bar{\mu}_{\text{зо}}$  и  $\beta_{\text{зо}}(\theta)$  – частота и плотность вероятности распределения пауз в электроснабжении, соответствующих времени восстановления электрооборудования части системы, находящейся после накопителя;  $\theta_{\text{зо}}$  – время восстановления резервируемого электрооборудования,  $t_n$  – время разрядки накопителя.

Результаты расчета (7) приведены на рис. 2. Видно, что с увеличением времени разряда накопителя надежность системы нелинейно возрастает. В то же время, при использовании аккумуляторных батарей в качестве накопителя, их надежность и срок службы во многом зависят от ёмкости. Использование избыточной ёмкости аккумулятора сопровождается не только увеличением продолжительности его разряда на нагрузку, но и ужесточает требования к циклу заряда/перезаряда, в частности к величине токов и времени заряда, т.к. продолжительная работа аккумулятора в режиме неполного заряда резко снижает срок его службы. Поэтому для повышения срока службы аккумуляторов в случае их использования в качестве накопителей ёмкость аккумуляторов желательно выбирать из требования минимально допустимого времени их разряда. Кроме того, следует отметить, что параллельное нагрузке включение аккумуляторной батареи как источника электрической емкости может влиять на изменение коэффициента мощности всей системы.



**Рис. 2.** Взаимосвязь вероятности работы системы и времени разрядки накопителя:  
 а) при  $\bar{\lambda}_{вх} = 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ; б) при  $\bar{\lambda}_{вх} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ ; в) при  $\bar{\lambda}_{вх} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$   
 (разработано автором)

Предположим, что для обеспечения временного резервирования при сокращении непроизводительных издержек в накопителе, время разряда накопителя должно быть равно времени восстановления системы. Рассмотрим, как изменится эффективность временного резервирования, если в обеспечение минимальной ёмкости аккумулятора, время разряда накопителя будет отличаться от времени, необходимого для восстановления системы. Полагаем, что накопитель обладает единичной производительностью, потери в сети отсутствуют. Тогда:

$$\bar{\tau}_{ввых}(\tau) = \frac{p_{ввых}}{\bar{\mu}_{ввых}} = \frac{(p_{вх} \bar{\lambda}_{вх} - I) \cdot \bar{\theta}_{вх}}{\Psi \cdot (1 - p_{ввых})}, \quad (8)$$

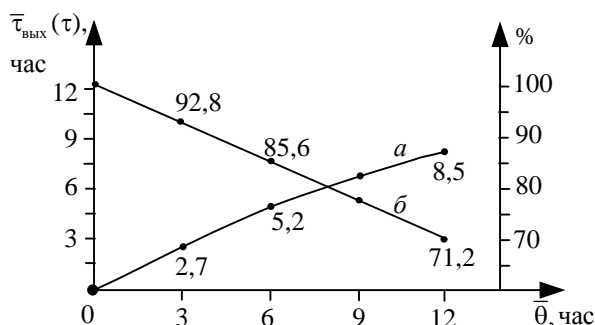
где  $p_{вх}$ ,  $\bar{\lambda}_{вх}$ ,  $\bar{\theta}_{вх}$  – вероятность работы, частота отказов и время восстановления системы на входе накопителя;  $I$  – интенсивность потерь сети;  $\Psi$  – производительностью накопителя;  $p_{ввых}$  – вероятность осуществления питания электрооборудования на выходе накопителя.

Результаты расчета (8) приведены на рис. 3 (кривая а). Из него следует, что с увеличением времени восстановления системы увеличивается разница между реальным и теоретическими значениями времени питания сети от источника. Это объясняется снижением вероятности работы системы с ростом времени восстановления её элементов при наличии временной избыточности.

С целью оценки обеспечения требуемого уровня надёжности рассматриваемой системы (рис.1) при введении в её структуру временной избыточности сравним теоретически необходимое и расчётное время работы накопителя (рис. 3, кривая а). Для этого нашли долю длительности отказа, в течение которой питание сети отсутствует, относительно полного времени восстановления как

$$\frac{(\bar{\theta}_{ввых} - \bar{\tau}_{ввых}) \cdot 100\%}{\bar{\theta}_{ввых}}$$

. Отняв полученную величину от 100% (требуемая величина безотказности), получили процент обеспечения необходимого уровня надёжности функционирования системы при разной длительности времени восстановления (рис.3, кривая б).



**Рис.3.** а) Расчётная кривая изменения времени питания сети от накопителя в зависимости от времени восстановления системы; б) доля обеспечения необходимого уровня безотказности анализируемой системы для разных значений времени её восстановления (разработано автором)

В качестве реального объекта для оценки эффективности использования резервирования замещением проанализируем показатели отходящих линий 6 кВ типовой схемы подстанции. Для расчетного участка выделим элементы: шины 6 кВ, шинный разъединитель, масляный выключатель, линейный разъединитель, кабельная линия 6 кВ, а также устройства защиты (рис. 4). Показатели надежности определены на основании статистических данных.

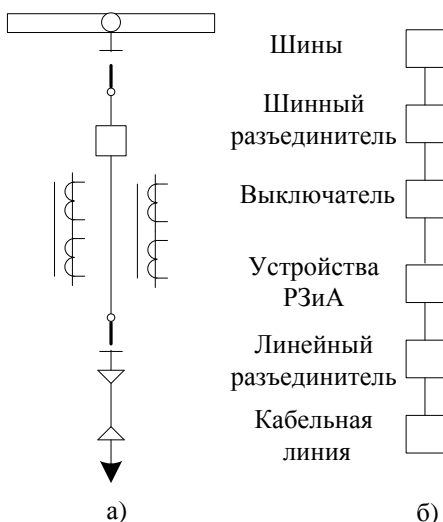
Предположим, что с целью повышения безотказности, вся рассматриваемая последовательная цепочка зарезервирована автономным источником питания с безотказностью, равной безотказности рассматриваемого участка. Результаты расчета (6), приведены в табл. 2.

**Таблица 2**

**Параметры электрической цепи рис. 3 до и после внедрения избыточности**

	Исходная система	Резервирование замещением
Интенсивность отказов $\lambda$ , год <sup>-1</sup>	0,687	0,905
Вероятность работы	0,999137	0,999998
Вероятность отказа	$8,63 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-5}$
Доля снижения вероятности отказа системы, %	—	- 98,1

(разработано автором)



**Рис. 4.** Электрическая схема (а) и блок-схема (б) рассматриваемого участка сети  
(разработано автором)

Используя данные расчета вероятности работы и отказа, приведенные в табл.2, по (3) возможно оценить, насколько использование избыточности в рассматриваемой схеме, позволяет снизить вероятность отказа данной системы относительно аналогичных параметров в системе без использования резервирования. Из расчета следует, что, несмотря на увеличение интенсивности отказов (на 31,9%), вероятность отказа снижается на 98,1 %. Это говорит о том, что использование избыточности практически устраняет влияние отказов основного оборудования и резервного источника на работу всей системы в целом.

### Выводы

1. Выявили, что введение временной избыточности позволяет значительно снизить вероятность отказа системы. Для схемы отходящей линии 6 кВ резервирование замещением снижает вероятность возникновения отказа на 98,1% относительно аналогичной схемы без резерва.
2. Показали, что изменение влияния временного резервирования на вероятность работы системы является нелинейной зависимостью, и определяется как частотой отказов, так и параметрами самого накопителя. Таким образом, для достижения необходимого уровня надежности системы введением временного резервирования возможно варьировать как параметры самой системы, так и время разряда накопителя.
3. Выяснили, что реальное время питания системы от накопителя отличается от теоретически необходимого значения. При этом с ростом времени восстановления системы снижается доля обеспечения необходимого уровня безотказности системы, что вносит свои коррективы в процесс выбора резервного источника.



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Шпиганович А.Н., Пестунов В.А.** Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения. – Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, Липецк: ЛГТУ, 2004. – 281 с.
2. **Смородина Н.В., Довженко С.В.** Численный метод моделирования структурно-временного резервирования в электротехнических системах, Вести высших учебных заведений Черноземья, 2011, №3.
3. **Шпиганович А.А., Ляпин С.А., Квашнина Г.В.** Формирование параметров элементов, определяющих функционирование технических систем, Вести высших учебных заведений Черноземья, 2012, №1 (27), С. 3–5.
4. **Квашнина Г.В.** Повышение эффективности функционирования сложных систем посредством применения избыточностей: мат-лы XVII Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Бенардосовские чтения). Т1. – Иваново, 2013. – С.240–242
5. **Квашнина Г.В., Шпиганович А.Н.** Временное резервирование как актуальный способ повышения эффективности сложных систем: мат-лы Междунар. заочной науч.-практ. конф. – Липецк, 2013. С. 25-27
6. **Квашнина Г.В.** Оценка обеспечения безотказности электроснабжения потребителей при использовании в системе временной избыточности, Омский научный вестник, 2014, №2 (130). – С. 165-168
7. **Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Бош В.И.** Случайные импульсные потоки. – Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, Липецк: ЛГТУ, 2004. – 292 с.
8. **Венцель Е.С., Овчаров Л.А.** Теория случайных процессов и ее инженерные приложения – М.: Высш.Шк., 2000. – 383 с.
9. **Квашнина Г.В.** Анализ возможности обеспечения бесперебойности электроснабжения при использовании временного резерва: мат-лы XIII Междунар. науч.-практ. конф. «Современное состояние естественных и технических наук» – М.: Издательство «Спутник +», 16 декабря 2013. – 150 с.
10. **Матвеевский В.Р.** Надежность технических систем: учебное пособие. – М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2002. – 113 с.

**Рецензент:** Чашин Евгений Анатольевич, Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегряева, кафедра Электротехники, заведующий кафедрой Электротехники, кандидат технических наук, доцент

**Galina Kvashnina**

FSFEI of HPE «Lipetsk State Technical University»

Russia, Lipetsk

[g.v.kvashnina@ya.ru](mailto:g.v.kvashnina@ya.ru)

## **The reliability increasing of power supply by temporary redundancy by using the accumulator in the system**

**Abstract.** Modern electric power supply systems are complicated tall structures. The guaranteeing of their quality and the reliability is the major task and at the same time one of the most important problems, which faces us by construction and operation of any electrical system. The existing methods of reliability guaranteeing provide for the introduction of excess capacity. However, this leads to increase of energy consumption and operating costs. Therefore, the use of the temporary redundancy as a method of the reliability increasing of power supply is suggested.

The description of electrical system's elements interaction by temporary redundancy is based on the mathematical apparatus of the theory of random impulse flows. The example of parameters' calculation of the scheme with the installation of an accumulator is presented. The correspondence of the calculated and theoretical parameters is analyzed; the received results are estimated.

The results allow monitoring of the changing influence of temporal redundancy on the reliability of power supply by various system parameters, types of the accumulator and failure durations. The study showed that the use of temporary redundancy leads to considerable decrease of failure appearance in power supply systems.

**Keywords:** power supply system; redundancy; temporary redundancy; standby power supply; accumulator; accumulator's discharge duration; reliability; replacement redundancy; energy efficiency; theory of random impulse flows.

## REFERENCES

1. Shpiganovich A.N., Pestunov V.A. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovaniya sistem jelektrosnabzheniya [Increasing efficiency of power supply systems]. – Elec: EGU im. I.A. Bunina, Lipeck: LGTU, 2004, 281 p.
2. Smorodina N.V., Dovzhenko S.V. Chislennyy metod modelirovaniya strukturno-vremennogo rezervirovaniya v elektrotekhnicheskikh sistemakh, Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya, 2011, №3.
3. Shpiganovich A.A., Ljapin S.A., Kvashnina G.V. Formirovanie parametrov jelementov, opredel'ajushhih funkcionirovanie tehnicheskikh sistem [The formation of the elements' parameters that determine the functioning of technical systems], in Vesti vysshih uchebnykh zavedenij Chernozem'ja [Proceedings of higher educational institutions of Chernozem region], 2012, №1 (27), pp. 3–5.
4. Kvashnina G.V. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovaniya slozhnyh sistem posredstvom primeneniya izbytochnostej [Increase of efficiency of complex systems' functioning through the application of redundancies]: in materialy XVII Mezhdunar. nauch.tekhn. konf. «Sostojanie i perspektivy razvitija jelektrotehnologii» (Benardosovskie chtenija). – Ivanovo, 2013, vol. 1, pp. 240–242
5. Kvashnina G.V., Shpiganovich A.N. Vremennoe rezervirovanie kak aktual'nyj sposob povysheniya jeffektivnosti slozhnyh sistem [Temporary redundancy as an important way of increasing the efficiency of complex systems]: in materialy Mezhdunar. zaochnoj nauch.-prakt. konf. – Lipeck, 2013, pp. 25-27
6. Kvashnina G.V. Otsenka obespecheniya bezotkaznosti jelektrosnabzheniya potrebiteley pri ispol'zovanii v sisteme vremennoy izbytochnosti, Omskiy nauchnyy vestnik, 2014, №2 (130). – S. 165-168
7. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Bosh V.I. Sluchajnye impul'snye potoki [Random impulse flows]. – Elec: EGU im. I.A. Bunina, Lipeck: LGTU, 2004, 292 p.
8. Ventsel' E.S., Ovcharov L.A. Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya – M.: Vyssh.Shk., 2000. – 383 s.
9. Kvashnina G.V. Analiz vozmozhnosti obespecheniya bespereboynosti jelektrosnabzheniya pri ispol'zovanii vremennogo rezerva: mat-ly KhIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «So-vremennoe sostoyanie estestvennykh i tekhnicheskikh nauk» – M.: Izdatel'stvo «Sputnik +», 16 dekabrya 2013. – 150 s.
10. Matveevskiy V.R. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: uchebnoe posobie. – M.: Moskovskiy gosudarstvennyy institut elektroniki i matematiki, 2002. – 113 s.