

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.314.58

doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-94-100

## СРАВНЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИСТОЧНИКОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Максим Сергеевич Сиротский<sup>1✉</sup>, Александр Анатольевич Пугачев<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> sirotskiyms@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0269-3031>

<sup>2</sup> alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

**Аннотация.** Рассмотрены несколько видов резервированных систем электротехнических комплексов, построенных с применением источников бесперебойного питания (ИБП), а также исследована надежность выбранных конфигураций. Разобраны четыре основные конфигурации систем с ИБП, а именно: стандартная  $N$ , изолированная  $N_{\text{из}}$ , параллельная  $N+1$ , избыточная параллельная  $2(N+1)$ . Результаты, полученные в ходе этого исследования, могут сыграть важную роль в выборе и применении систем ИБП. Параметры надежности ИБП, такие как интенсивность отказов, среднее время между отказами и доступность системы, оцениваются с помощью структурного метода блок-схем надежности.

**Ключевые слова:** ИБП, электротехнический комплекс, надежность, частота отказов, доступность, работа на отказ

**Для цитирования:** Сиротский М.С., Пугачев А.А. Сравнение надежности источников бесперебойного питания в различных системах резервирования // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2026. №1 (31). С. 94-100. doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-94-100.

Original article

Open Access Article

## COMPARISON OF UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY RELIABILITY IN VARIOUS REDUNDANCY SYSTEMS

Maksim S. Sirotskiy<sup>1✉</sup>, Alexander A. Pugachev<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> sirotskiyms@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0269-3031>

<sup>2</sup> alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

**Abstract.** The paper considers several types of redundant systems for electrical engineering complexes built using uninterruptible power supplies (UPS), and examines the reliability of the selected configurations; analyses four main configurations of UPS systems, namely standard  $N$ , isolated  $N_{\text{из}}$ , parallel  $N+1$ , and redundant parallel  $2(N+1)$ . The results obtained in this study can play an important role in selecting and implementing UPS systems. UPS reliability parameters, such as failure rate, mean time between failures, and system availability, are assessed using the structural reliability block diagram method.

**Keywords:** UPS, electrical engineering complex, reliability, failure rate, availability, mean time between failures

**For citation:** Sirotskiy M.S., Pugachev A.A. Comparison of Uninterruptible Power Supply Reliability in Various Redundancy Systems. Automation and modeling in design and management, 2026, no. 1 (31). pp. 94-100. doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-94-100.

### Введение

Распространение критических нагрузок в электротехнических комплексах, информационных технологиях, системах связи и медицинском оборудовании, а также проблемы, связанные с качеством сетевой электроэнергии, подтолкнули к разработке ИБП. Оценка надежности систем бесперебойного питания позволяет проектировщикам, производителям и конечному пользователю гарантировать, что ИБП сможет поддерживать критические нагрузки в течение

определенного времени в непредвиденных обстоятельствах. Полученные параметры надежности можно использовать для сравнения конструкции, типов и конфигурации установленной системы ИБП. Кроме того, расчетные показатели надежности очень полезны при планировании технического обслуживания системы, чтобы избежать незапланированного технического обслуживания и оперативного ремонта.

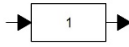

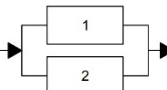
В статье определим несколько параметров, которые важны при оценке надежности системы ИБП [1, 2]:

- 1) надежность ( $P$ ) – способность элемента выполнять требуемую функцию в указанных условиях в течение указанного периода времени;
- 2) интенсивность отказов ( $\lambda$ ) – среднее количество отказов системы в единицу времени;
- 3) интенсивность восстановления ( $\mu$ ) – вероятность восстановления работоспособности в единицу времени;
- 4) среднее времени между отказами ( $t_{cp}$ ) – ожидаемое время работы между двумя отказами в восстанавливаемой системе;
- 5) доступность ( $A$ ) и недоступность ( $W$ ) – способность элемента находиться в состоянии, позволяющем выполнять требуемую функцию при указанных условиях в данный момент времени.

В качестве способа определения надежности резервированного электротехнического комплекса с ИБП выберем структурный метод на основе блок-схем, который показывает разделение системы и описывает, каким образом она должна работать [3]. В этом методе компоненты в системе представлены блоком, который находится в одном из двух возможных состояний: работоспособном или неисправном. Параметры надежности компонента (т.е. интенсивность отказов и восстановления) назначаются каждому блоку, а оценка надежности системы проводится в соответствии с полученной блок-схемой и условиями эксплуатации системы.

Таблица 1  
Table 1

Данные для расчета надежности и доступности компонентов системы  
Data for calculating the reliability and availability of system components

№ п.	Наименование компонента	Графическое обозначение компонента	Формула для расчета
1	Одиночный		$P = e^{-\lambda t}$ $A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$
2	Последовательный		$\lambda_S = \lambda_1 + \lambda_2$ $P_S = e^{-\lambda_S t}$ $W_S = W_1 e^{-\mu_1 T} + W_2 e^{-\mu_2 T}$
3	Параллельный		$\lambda_P = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ $P_P = e^{-\lambda_P t}$ $W_S = W_1 e^{-\mu_1 T} \cdot W_2 e^{-\mu_2 T}$

Для расчета параметров надежности исследуем следующие конфигурации резервированных систем электротехнических комплексов с ИБП: стандартная  $N$ , изолированная  $N_{iz}$ , параллельная  $N+1$ , избыточная параллельная  $2(N+1)$ .

Уровень надежности каждой конфигурации оценивается с использованием параметров надежности компонентов, входящих в состав системы.

### Исследование конфигураций ИБП

*Стандартная система  $N$* : является наиболее распространенной конфигурацией в комплексе. В нормальном режиме работы нагрузка питается через ИБП. В случае отказа ИБП или во время технического обслуживания нагрузка подключается к блоку распределения питания

(РП) через линию ручного байпаса (РБ), как показано на рис. 1, а. Во время работы байпаса нагрузка подключена параллельно ИБП, что оказывает негативное значение для высокочувствительных систем. Модель надежности на рис. 1, б показывает, что нагрузка будет питаться только от резервированной линии (через ИБП) или нерезервированной (линия РБ), что предполагает обеспечение меньшей избыточности системы и, таким образом, ограничивает защиту нагрузки.

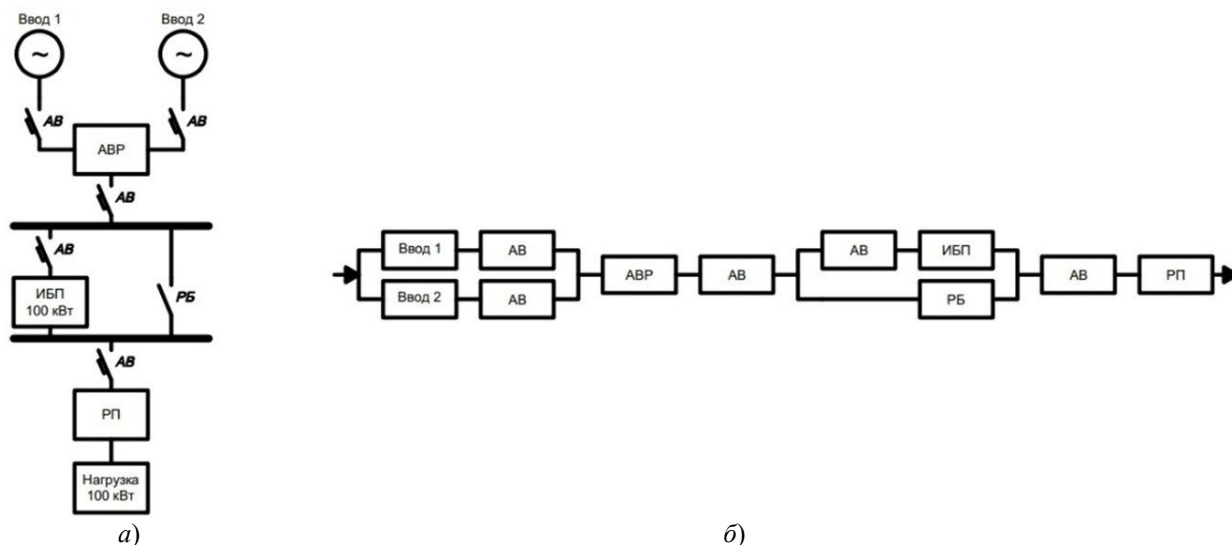


Рис. 1. Конфигурация (а) и модель надежности (б) стандартной системы  $N$   
 Fig. 1. Configuration (a) and reliability model (b) of the standard  $N$  system

*Изолированная система  $N_{iz}$* : во время нормальной работы основной ИБП1 будет полностью поддерживать нагрузку, а изолированный или вторичный ИБП2 будет находиться в режиме ожидания, как показано на рис. 2, а. Когда ИБП1 выходит из строя или находится на обслуживании, система переключится на автоматический байпас (АБ), что позволит мгновенно подключить нагрузку к ИБП2.

Два ИБП независимы друг от друга и не нуждаются в синхронизации между собой, что делает их более гибкими, позволяет иметь разную мощность, марку и модель. Вторичный ИБП2 должен быть в состоянии справиться с внезапным скачком нагрузки во время переключения (нагрузкой 0 % перед переключением). Модель надежности на рис. 2, б показывает, что эта конфигурация сильно зависит от работы АБ во время переключения питания, чтобы обеспечить бесперебойное питание нагрузки.

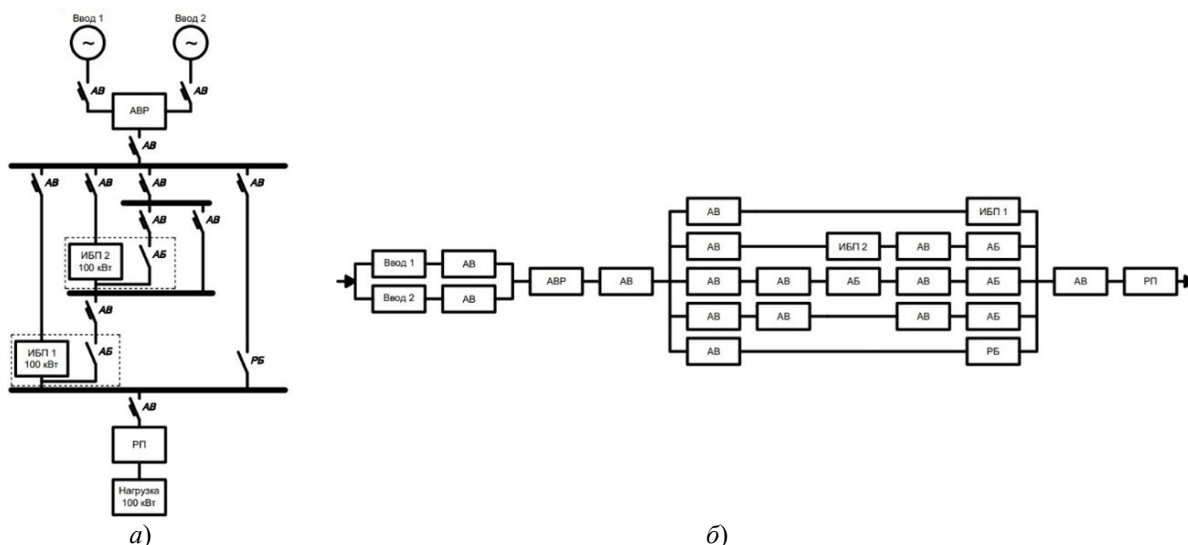


Рис. 2. Конфигурация (а) и модель надежности (б) изолированной системы  $N_{iz}$   
 Fig. 2. Configuration (a) and reliability model (b) of an isolated  $N_{iz}$  system

*Параллельная система N+1:* ИБП1 и ИБП2 равномерно распределяют нагрузку, при этом любой отдельный ИБП способен поддерживать нагрузку во время отказа или обслуживания другого ИБП (рис. 3, а). Такая схема имеет более низкую вероятность отказа системы по сравнению со схемой изолированного резервирования  $N_{iz}$ , поскольку все ИБП находятся в режиме онлайн и поддерживают нагрузку в любое время и не будет внезапного скачка нагрузки во время переключения. Однако, поскольку все модули ИБП требуют синхронизации между собой, они должны иметь одинаковую конструкцию, мощность, марку и модель. На рис. 3, б показана модель надежности для параллельной конфигурации N+1.

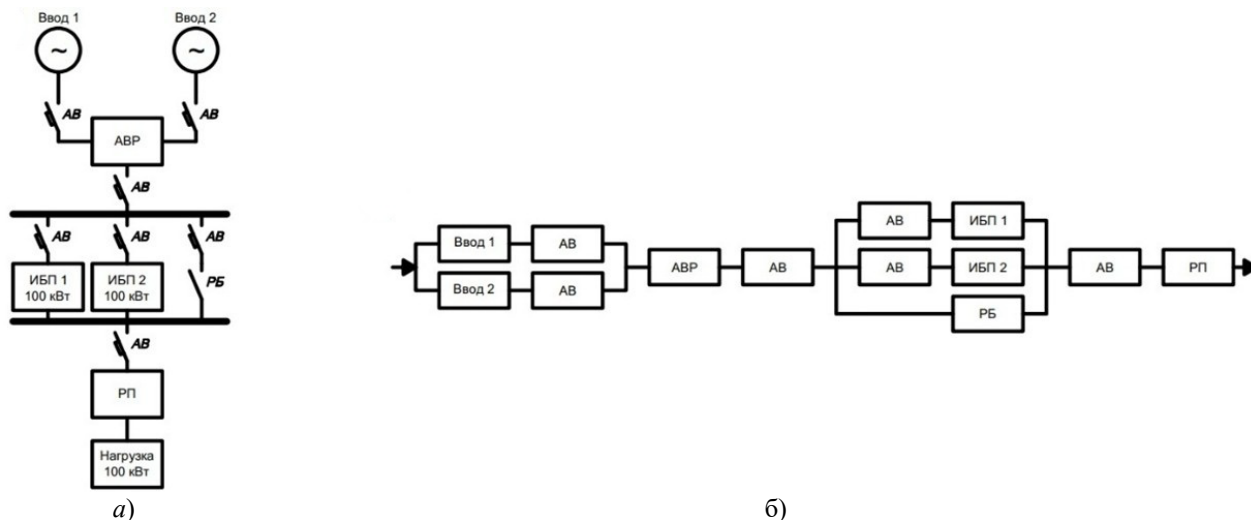


Рис. 3. Конфигурация (а) и модель надежности (б) параллельной системы N+1  
 Fig. 3. Configuration (a) and reliability model (b) of a parallel N+1 system

*Избыточная параллельная система 2(N+1):* данная конфигурация является самой надежной и самой дорогой среди резервированных систем электротехнических комплексов с ИБП. Она состоит из двух параллельных резервированных систем, которые соединены параллельно, как показано на рис. 4, а. Как показано в модели надежности (рис. 4, б), эта конфигурация обеспечивает полное резервирование, даже во время обслуживания.

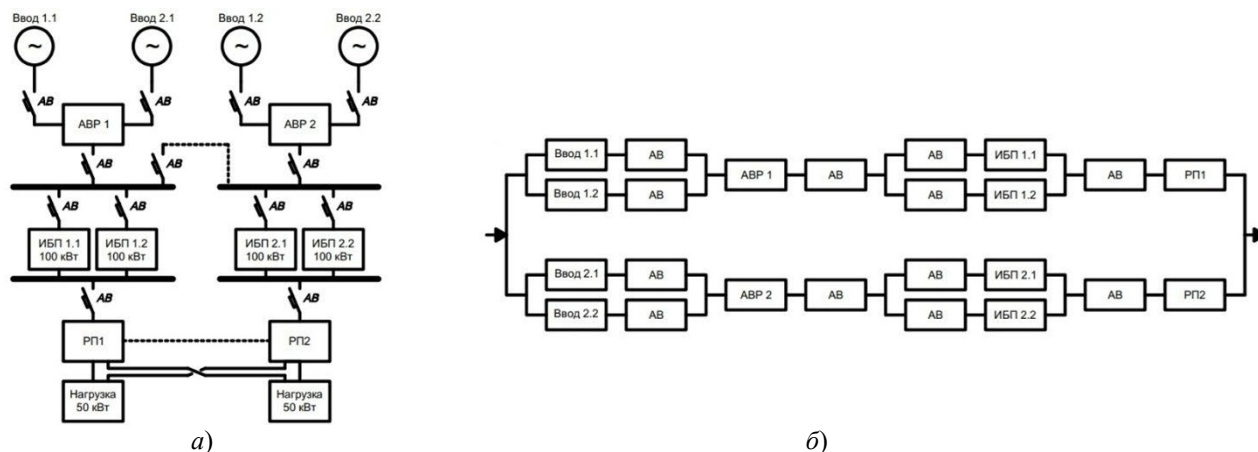


Рис. 4. Конфигурация (а) и модель надежности (б) избыточной параллельной системы 2(N+1)  
 Fig. 4. Configuration (a) and reliability model (b) of a redundant parallel system 2(N+1)

### Расчет и сравнение надежности резервированных конфигураций с ИБП

Для проведения исследования и оценки надежности систем требуются интенсивность отказов и восстановления для каждого компонента в системе с ИБП. Эти оценочные значения получены из справочников по надежности [4, 5] и паспортов на оборудование, которые основаны на измеренных эксплуатационных данных. В табл. 2 представлены показатели надежности для компонентов системы, использованных в этом исследовании.

Показатели надежности компонентов в резервированной системе с ИБП  
Reliability indicators of components in a redundant system with UPS

№ п.	Наименование компонента	Обозначение компонента	Интенсивность отказов, $\lambda$ (1/час)	Интенсивность восстановления, $\mu$ (1/час)
1	Ввод от сети	Ввод 1	$3,887 \times 10^{-3}$	0,232
2	Ввод от генератора	Ввод 2	$1,027 \times 10^{-4}$	0,256
3	Автоматический ввод резерва	АВР	$9,795 \times 10^{-6}$	0,174
4	Автоматический выключатель	АВ	$4,348 \times 10^{-6}$	0,455
5	Источник бесперебойного питания	ИБП	$3,640 \times 10^{-5}$	0,125
6	Автоматический байпас	АБ	$4,160 \times 10^{-6}$	0,167
7	Ручной байпас	РБ	$4,160 \times 10^{-6}$	0,167
8	Блок распределения питания	РП	$7,078 \times 10^{-7}$	0,064

Для оценки надежности с последующим репрезентативным анализом, с учетом данных и показателей надежности, представленных в табл. 1, 2, проведен расчет интенсивности отказов согласно следующих зависимостей:

$$\lambda_{in} = \frac{(\lambda_{ВВОД1} + \lambda_{АВ}) \cdot (\lambda_{ВВОД2} + \lambda_{АВ})}{\lambda_{ВВОД1} + 2\lambda_{АВ} + \lambda_{ВВОД2}} + \lambda_{АВР} + \lambda_{АВ}; \quad (1)$$

$$\lambda_{N,0} = \frac{(\lambda_{АВ} + \lambda_{ИБП}) \cdot \lambda_{РБ}}{\lambda_{АВ} + \lambda_{ИБП} + \lambda_{РБ}}; \quad (2)$$

$$\lambda_{Niz,1} = \frac{(\lambda_{АВ} + \lambda_{ИБП}) \cdot (2\lambda_{АВ} + \lambda_{ИБП} + \lambda_{АВ})}{3\lambda_{АВ} + 2\lambda_{ИБП} + \lambda_{АВ}}; \quad (3)$$

$$\lambda_{Niz,2} = \frac{(3\lambda_{АВ} + 2\lambda_{АВ}) \cdot (3\lambda_{АВ} + \lambda_{АВ})}{6\lambda_{АВ} + 3\lambda_{АВ}}; \quad (4)$$

$$\lambda_{Niz,0} = \frac{(\frac{\lambda_{Niz,1} \cdot \lambda_{Niz,2}}{\lambda_{Niz,1} + \lambda_{Niz,2}}) \cdot (\lambda_{АВ} + \lambda_{РБ})}{(\frac{\lambda_{Niz,1} \cdot \lambda_{Niz,2}}{\lambda_{Niz,1} + \lambda_{Niz,2}}) + \lambda_{АВ} + \lambda_{РБ}}; \quad (5)$$

$$\lambda_{N+1,0} = \frac{(\lambda_{АВ} + \lambda_{ИБП}) \cdot \lambda_{РБ}}{\lambda_{АВ} + \lambda_{ИБП} + 2\lambda_{РБ}}; \quad (6)$$

$$\lambda_{2(N+1),0} = \frac{(\lambda_{АВ} + \lambda_{ИБП})}{2}; \quad (7)$$

$$\lambda_{out} = \lambda_{АВ} + \lambda_{РП}; \quad (8)$$

$$\lambda_N = \lambda_{in} + \lambda_{N,0} + \lambda_{out}; \quad (9)$$

$$\lambda_{Niz} = \lambda_{in} + \lambda_{Niz,0} + \lambda_{out}; \quad (10)$$

$$\lambda_{N+1} = \lambda_{in} + \lambda_{N+1,0} + \lambda_{out}; \quad (11)$$

$$\lambda_{2(N+1)} = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{2(N+1),0} + \lambda_{out}}{2}, \quad (12)$$

где  $\lambda_{in}$ ,  $\lambda_{out}$  – интенсивность отказов вводной и выводной группы;  $\lambda_N$ ,  $\lambda_{Niz}$ ,  $\lambda_{N+1}$ ,  $\lambda_{2(N+1)}$  – интенсивность отказов четырех конфигураций резервированных систем электротехнических комплексов с ИБП.

Недоступность конфигураций анализируемых систем рассчитана согласно следующих зависимостей:

$$W_{in} = (W_{ВВОД1} e^{-\mu_{ВВОД1} T} + W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T}) \cdot (W_{ВВОД2} e^{-\mu_{ВВОД2} T} + W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T}) + W_{АВР} e^{-\mu_{АВР} T} + W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T}; \quad (13)$$

$$W_{N,0} = (W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T} + W_{ИБП} e^{-\mu_{ИБП} T}) \cdot W_{РБ} e^{-\mu_{РБ} T}; \quad (14)$$

$$W_{Niz,0} = (W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T} + W_{ИБП} e^{-\mu_{ИБП} T}) \cdot (2W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T} + W_{ИБП} e^{-\mu_{ИБП} T} + W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T}) \cdot (3W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T} + 2W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T}) \cdot (3W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T} + W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T}); \quad (15)$$

$$W_{N+1,0} = (W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T} + W_{ИБП} e^{-\mu_{ИБП} T})^2 \cdot W_{РБ} e^{-\mu_{РБ} T}; \quad (16)$$

$$W_{2(N+1),0} = (W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T} + W_{ИБП} e^{-\mu_{ИБП} T})^2; \quad (17)$$

$$W_{out} = W_{АВ} e^{-\mu_{АВ} T} + W_{РП} e^{-\mu_{РП} T}; \quad (18)$$

$$W_N = W_{in} + W_{N,0} + W_{out}; \quad (19)$$

$$W_{Niz} = W_{in} + W_{Niz,0} + W_{out}; \quad (20)$$

$$W_{N+1} = W_{in} + W_{N+1,0} + W_{out}; \quad (21)$$

$$W_{2(N+1)} = (W_{in} + W_{2(N+1),0} + W_{out})^2, \quad (22)$$

где  $W_{in}$ ,  $W_{out}$  – недоступность вводной и выводной группы;  $W_N$ ,  $W_{Niz}$ ,  $W_{N+1}$ ,  $W_{2(N+1)}$  – недоступность четырех конфигураций резервированных систем электротехнических комплексов с ИБП.

Табл. 3 показывает результаты оценки надежности, полученные структурным методом на основе блок-схем, указывающие интенсивность отказов системы и среднее время между отказами для каждой изучаемой конфигурации системы с ИБП. Результаты также отражены на диаграмме рис. 5.

Таблица 3  
Table 3

Показатели надежности компонентов в резервированной системе с ИБП  
*Reliability indicators of components in a redundant system with UPS*

№ п.	Наименование резервированной системы	Интенсивность отказов $\lambda$ , 1/час	Среднее время между отказами $t_{cp}$ , лет	Доступность $A(t)$ , %	Недоступность $W(t)$ , мин/год
1	Стандартная $N$	$1,155 \times 10^{-4}$	0,998	99,917354	434,387
2	Изолированная $N_{iz}$	$1,054 \times 10^{-4}$	1,083	99,921687	411,613
3	Параллельная $N+1$	$1,032 \times 10^{-4}$	1,106	99,927355	381,822
4	Избыточная параллельная $2(N+1)$	$3,630 \times 10^{-5}$	3,145	99,999942	0,306

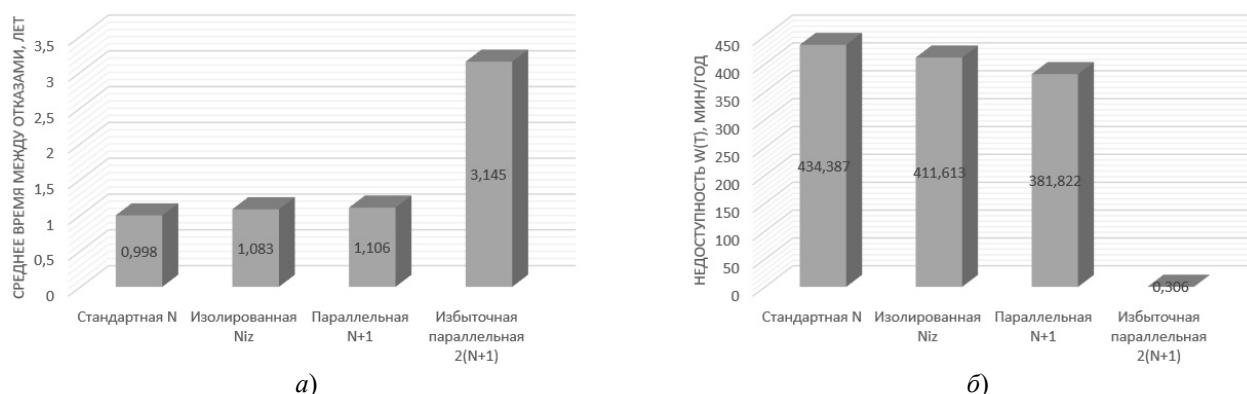


Рис. 5. Показатели надежности резервированных систем с ИБП: среднее время между отказами  $t_{cp}$  (а) и недоступность  $W(t)$  (б)  
*Fig. 5. Reliability indicators of redundant systems with UPS: mean time between failures  $t_{cp}$  (a) and unavailability  $W(t)$  (b)*

Сравнение результатов исследования безотказной работы (см. рис. 5, а) показывает следующее:

- 1) избыточная параллельная система  $2(N+1)$  обеспечивает наивысшее значение  $t_{cp}$  по сравнению со всеми другими конфигурациями;
- 2) стандартная система  $N$  ожидаемо обеспечивает наименьшее значение среднего времени между отказами  $t_{cp}$ ;
- 3) изолированная  $N_{iz}$  и параллельная  $N+1$  системы показали неожиданно низкий уровень надежности.

Также очень важным показателем исследования надежности в данном исследовании является недоступность системы (в мин/год), как показано на рис. 5, б. Из графика можно сделать следующие выводы:

- 1) избыточная параллельная система  $2(N+1)$  обеспечивает наименьшее значение недоступности (т.е. наивысшую доступность) по сравнению со всеми другими конфигурациями;
- 2) Стандартная  $N$ , изолированная  $N_{iz}$  и параллельная  $N+1$  системы показывают высокое значение недоступности (т.е. низкую доступность).

### Заключение

Проведен сравнительный обзор конфигураций резервированных систем электротехнических комплексов с ИБП и проведен расчет показателей надежности структурным методом на основе блок-схем. Выбранный метод позволил оценить полезные параметры надежности систем с использованием ИБП, такие как интенсивность отказов, среднее время между отказами и доступность, что позволило провести сравнения по надежности всех выбранных конфигураций. Анализ интенсивности отказов компонентов ИБП в исследовании показал влияние на общее значение среднего времени между отказами всей системы.

В результате исследования установлено, что избыточная параллельная система  $2(N+1)$

обеспечивает наивысшее среднее время безотказной работы и доступность за счет полного резервирования и устранения отдельных точек отказа. При этом дорогостоящие изолированная  $N_{iz}$  и параллельная  $N+1$  системы резервирования не сильно отличаются от стандартной конфигурации  $N$ , которая обладает минимальными требованиями для обеспечения защиты нагрузки и обеспечивает самые низкие значения надежности.

#### Список источников:

1. Bentley J. Reliability & Quality Engineering, 3rd Edition, Addison-Wesley, 1999.
2. Прасов М.Т., Степанов Ю.С. Эксплуатационная надежность электронных средств: учебное пособие для высшего профессионального образования // Орел: ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2011.
3. Villemeur A. Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment: Vol. 1, John Wiley and Sons, 2000.
4. MIL-HDBK-338B: Military Handbook: Electronic Reliability Design Handbook.
5. BS 5760-2:1994 Reliability of Systems, Equipment and Components - Part 2: Guide to the assessment of reliability, 1994.

#### Информация об авторах:

##### Сиротский Максим Сергеевич

аспирант кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, ORCID 0009-0003-0269-3031.

##### Пугачев Александр Анатольевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» Брянского государственного технического университета, ORCID 0000-0002-1836-0923

#### References:

1. Bentley J. Reliability & Quality Engineering. 3rd ed. Addison-Wesley; 1999.
2. Prasov M.T., Stepanov Y.S. Operational Reliability of Electronic Devices. Orel: State University-UNPK; 2011.
3. Villemeur A. Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment. John Wiley and Sons; 2000; vol. 1.
4. MIL-HDBK-338B: Military Handbook: Electronic Reliability Design Handbook.
5. BS 5760-2:1994 Reliability of Systems, Equipment and Components. Guide to the Assessment of Reliability; 1994.

#### Information about the authors:

##### Sirotskiy Maksim Sergeevich

Postgraduate Student at the Department of Electronic, radio-electronic and electrical systems of Bryansk State Technical University, ORCID 0009-0003-0269-3031.

##### Pugachev Alexander Anatolyevich

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of High-Tech Transport Engineering of Bryansk State Technical University, ORCID: 0000-0002-1836-0923.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 17.12.2025; одобрена после рецензирования 12.01.2026; принята к публикации 19.01.2026.**

**The article was submitted 17.12.2025; approved after reviewing 12.01.2026; accepted for publication 19.01.2026.**

**Рецензент** – Бутарев И.Ю., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Butarev I.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

---

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-02-61. E-mail: aim-pu@mail.ru

*Вёрстка А.Г. Малаханова. Редактор Д.А. Гулина.*

Сдано в набор 16.03.2026. Выход в свет 30.03.2026.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 11,63.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

---

12+