

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 621.396.6, 621.8.019.8  
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-9-741-751

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНО-МОДУЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

В. В. ЖАДНОВ, А. С. ЛУКИНА, И. С. ЦЕЛИЩЕВ

*Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,  
101000, Москва, Россия  
E-mail: vzhadnov@hse.ru*

Рассматриваются вопросы обеспечения эксплуатационной надежности модульных источников вторичного электропитания (ИВЭП) путем резервирования их силовых каналов. Используются методы теории надежности и имитационного моделирования. Представлен анализ основных способов резервирования модульных ИВЭП (нагруженного, ненагруженного, смешанного) и особенностей функционирования в них силовых каналов (временные графики работы каналов, изменение нагрузки работающих каналов, отказы каналов при их переключениях). С помощью специализированной программы, реализующей метод Монте-Карло, выполнены вычислительные эксперименты по оценке вероятности безотказной работы при различных способах резервирования. Показано, что для модульных ИВЭП невозможно заранее назначить способ резервирования, который обеспечит наибольшее значение вероятности безотказной работы, так как один и тот же способ может дать как лучшие, так и худшие результаты по сравнению с другими способами резервирования в зависимости от особенностей функционирования силовых каналов. Представлен анализ полученных результатов, на основе которого сделаны выводы об эффективности того или иного способа резервирования и даны рекомендации по их применению.

**Ключевые слова:** *источники вторичного электропитания, надежность, безотказность, силовой канал, резервирование, вероятность безотказной работы*

Источники вторичного электропитания (ИВЭП) должны обладать высокой надежностью, так как их отказ, как правило, приводит к отказу электронных средств, в состав которых они входят [1]. При проектировании ИВЭП используются различные виды исполнения их силовой части (моноблочный и модульный). Поскольку для обеспечения безотказности таких ИВЭП применяется резервирование (нагруженное, ненагруженное, смешанное), то предпочтение отдается магистрально-модульному исполнению<sup>1</sup>, что позволяет реализовать скользкое резервирование силовых модулей (каналов).

Однако повышение безотказности ИВЭП путем резервирования неизбежно приводит к росту его стоимости<sup>2</sup>. Так, применение резервирования для обеспечения заданного уровня вероятности безотказной работы ИВЭП связано с увеличением стоимости как самого источника

---

<sup>1</sup> Согласно ГОСТ Р 52003-2003.

<sup>2</sup> ГОСТ 27.003-2016.

(за счет введения резервных каналов), так и комплекта его ЗИП (для восстанавливаемых источников), а также затрат на содержание ремонтных бригад (в случае резервирования с непрерывным восстановлением). Поэтому задачу выбора того или иного способа резервирования силовых каналов необходимо решать уже на этапе проектирования ИВЭП, когда закладывается тот уровень безотказности, который будет реализован при его изготовлении и должен поддерживаться при эксплуатации.

По классификации гос. стандарта<sup>1</sup> силовая часть источника вторичного электропитания (СЧ ИВЭП) относится к радиоэлектронным устройствам (РЭУ), а силовые каналы — к радиоэлектронным функциональным узлам (РЭФУ), представляющим собой электронные модули первого уровня (ЭМ1).

На практике расчет надежности невосстанавливаемых РЭУ производится по структурным схемам надежности (ССН)<sup>2</sup>. Методика расчета для ССН „последовательное соединение“, позволяющая рассчитать характеристику безотказности ЭМ1 (силового канала) в режиме работы (интенсивность отказов  $\lambda_3$ ), и методика расчета показателей безотказности РЭУ для ССН „скользящее нагруженное резервирование“ и „скользящее ненагруженное резервирование“ регламентируются стандартом<sup>3</sup>.

При скользящем нагруженном резервировании РЭУ  $N$  основных узлов (ОУ) и  $M$  резервных узлов (РУ) находятся в режиме работы (рис. 1).

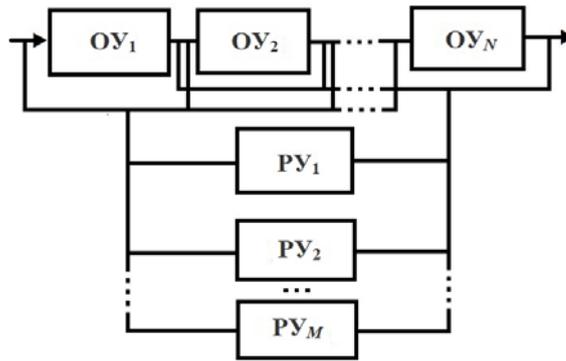


Рис. 1

Критерием отказа такой группы является отказ любых  $(M+1)$  узлов. Особенность функционирования силовых каналов в СЧ ИВЭП при таком способе резервирования заключается в том, что по мере отказов каналов нагрузка на оставшиеся работоспособные каналы будет возрастать, что может привести к изменению их характеристик надежности (возрастанию интенсивности отказов работающих каналов  $\lambda_p$ ):

$$\lambda_p = \lambda_p(K_H), \quad (1)$$

$$K_{H_m} = \frac{\lambda_3(N+m)}{\lambda_{ном}} \text{ при } m = 0, 1, 2, \dots, M, \quad (2)$$

где  $K_H$  — коэффициент нагрузки канала,  $\lambda_3(N+m)$  — интенсивность отказов канала при  $N+m$  работающих каналах,  $\lambda_{ном}$  — интенсивность отказов канала при номинальной нагрузке ( $K_H=1$ ).

При скользящем ненагруженном резервировании РЭУ основные узлы находятся в режиме работы, а резервные узлы — в режиме ожидания (рис. 2).

<sup>1</sup> ГОСТ Р 52003-2003.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 51901.14-2007.

<sup>3</sup> ОСТ 4Г 0.012.242-84.

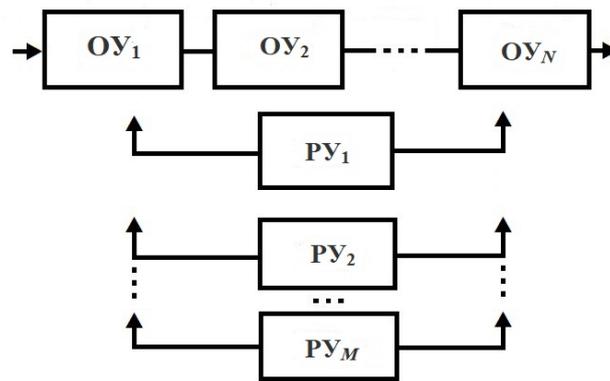


Рис. 2

Критерием отказа такой группы является отказ  $(M+1)$  узлов.

Характеристикой надежности резервного узла в режиме ожидания является интенсивность его отказов ( $\lambda_x$ ), которая рассчитывается по приведенной в стандарте<sup>1</sup> методике. Особенность функционирования силовых каналов в СЧ ИВЭП при таком способе резервирования заключается в том, что нагрузка на каналы, находящиеся в режиме работы, будет неизменной ( $\lambda_p = \lambda_{ном}$ ), а резервные каналы могут отказать и в режиме ожидания, что может привести к изменению характеристик их надежности (возрастанию интенсивности отказов резервных каналов —  $\lambda_{p,k}$ ):

$$\lambda_{p,k} = K_{и.э} \cdot \lambda_p + (1 - K_{и.э}) \cdot \lambda_x, \quad (3)$$

$$K_{и.э} = t_{p,k} / t, \quad (4)$$

где  $K_{и.э}$  — коэффициент интенсивности эксплуатации резервного канала,  $\lambda_x$  — интенсивность отказов резервного канала в режиме ожидания,  $t_{p,k}$  — время работы резервного канала,  $t$  — время работы ИВЭП.

Кроме того, резервные каналы могут отказать также и в момент их подключения<sup>2</sup>, что может привести к снижению вероятности их безотказной работы ( $P_{p,k}$ ):

$$P_{p,k} = P_{p,k}(P_{вкл}), \quad (5)$$

где  $P_{вкл}$  — вероятность успешного перехода на резерв (подключения резервного канала).

Известной модификацией этого способа резервирования РЭУ является „ротация“ основных и резервных узлов, при которой они периодически переключаются из режима работы в режим ожидания и наоборот (рис. 3).

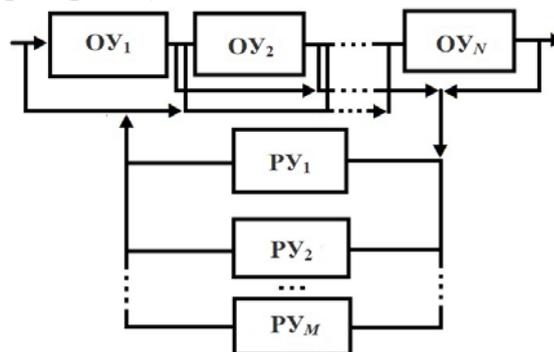


Рис. 3

Поскольку в этом случае нет разницы между основными и резервными узлами, то по классификации гос. стандарта<sup>3</sup> они относятся к изделиям многократного циклического

<sup>1</sup> ОСТ В 4Г 0.012.241-84.

<sup>2</sup> ГОСТ 27.003-2016.

<sup>3</sup> ГОСТ Р 52003-2003.

применения (МКЦП). Поэтому при ротации каналы в СЧ ИВЭП могут отказать не только в момент подключения, но и в момент отключения:

$$P_K = P_K(P_{\Pi}), \quad (6)$$

где  $P_{\Pi}$  — вероятность успешного переключения канала.

Так же как и при ненагруженном резервировании СЧ ИВЭП, нагрузка на каналы, находящиеся в режиме работы, будет неизменной ( $K_n=1$ ). Но в отличие от ненагруженного резервирования при ротации не только резервные, но и основные каналы могут отказать и в режиме ожидания (см. формулу (3)), причем значение  $K_{и.э}$  зависит от числа работоспособных каналов. В работе [2] показано, что в „идеальном“ случае, когда число ротаций стремится к бесконечности,

$$K_{и.э_m} = \frac{N}{N+m} \text{ при } m = 0, 1, 2, \dots, M. \quad (7)$$

Тогда при ротации каналов в СЧ ИВЭП расчет „верхней“ границы вероятности ее безотказной работы ( $P_B$ ) можно провести по формуле, приведенной в стандарте\* для ССН „скользящее нагруженное резервирование  $N$  из  $(N+M)$ “ при условии, что выполняются принятые стандартом допущения и ограничения, а число ротаций каналов стремится к бесконечности:

$$P_B = \sum_{m=0}^M \left[ C_{(N+M)}^m \cdot (e^{-\lambda_c \cdot t})^{(N+M)-m} \cdot (1 - e^{-\lambda_c \cdot t})^m \right], \quad (8)$$

где  $C$  — число сочетаний,  $\lambda_c$  — интенсивность отказов канала.

Так как каналы относятся к изделиям МКЦП, то значение  $\lambda_c$  рассчитывается по формуле (3) для „циклического“ режима применения ЭМ1, а коэффициент  $K_{и.э}$  — по формуле (7) при  $m=M$ .

Как следует из (8), эффект от ротации связан с величиной  $\lambda_c$  и он тем значимее, чем меньше значение  $K_{и.э}$  (так как  $\lambda_x \ll \lambda_p$ ), которое, в свою очередь, зависит от числа резервных каналов  $K$ . Но кроме  $K$  на величину  $\lambda_c$  влияют и параметры ротации.

Для того чтобы пояснить, как параметры ротации влияют на безотказность, рассмотрим СЧ ИВЭП, для которой характерно ненагруженное резервирование вида „3 из 4“ с ротацией, нагрузки каналов постоянны, отказы в режиме ожидания и при переключениях каналов не учитываются, а число ротаций каналов стремится к бесконечности. При этих условиях приращение наработок каналов ( $\Delta t_H$ ) определяется как

$$\Delta t_H = \frac{t_{H_{\min}}}{4} + \frac{t_{H_{\min}}}{4^2} + \frac{t_{H_{\min}}}{4^3} + \dots = t_{H_{\min}} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{4^i} = \frac{t_{H_{\min}}}{3}, \quad (9)$$

$$t_{H_{\min}} = \min_{i=1,4} (t_{H_1}, t_{H_2}, t_{H_3}, t_{H_4}), \quad (10)$$

где  $t_{H_1} \dots t_{H_4}$  — наработки каналов.

Из уравнения (9) следует, что период ротации  $\tau$  является переменной величиной, зависящей от  $t_{H_{\min}}$  ( $\tau_1 = t_{H_{\min}}/4$ ,  $\tau_2 = t_{H_{\min}}/16$ , ...). Поскольку наработки каналов, а следовательно, и значение  $t_{H_{\min}}$  заранее не известны, то на практике используется постоянный период  $\tau$ . Очевидно, что при постоянном  $\tau$  для повышения  $\Delta t_H$  необходимо выполнение условия

$$\tau \rightarrow 0. \quad (11)$$

Однако при чрезмерном уменьшении  $\tau$  прирост  $\Delta t_H$  резко снижается (см. формулу (9)), а число переключений возрастает (т.е. растет вероятность отказа ИВЭП из-за переключений каналов при  $P_{\Pi} < 1$ ).

Впрочем, выполнить условие (11) на практике вряд ли возможно, так как канал должен какое-то время отработать ( $t_p \neq 0$ ). Кроме того, для повышения качества электроснабжения потребителей в СЧ ИВЭП используется следующий порядок ротации каналов: сначала подклю-

\* ГОСТ 27.003-2016.

чается резервный канал, а затем отключается работающий, т.е. кроме  $t_p$  требуется время и на переключение канала ( $\Delta t_{\Pi} \neq 0$ ). Поэтому

$$\tau = \tau(t_p + \Delta t_{\Pi}) > 0. \quad (12)$$

Тем не менее и введение  $\Delta t_{\Pi}$  не всегда гарантирует качество электроснабжения потребителей при отказе канала, находящегося в режиме работы. Поэтому для обеспечения качества электроснабжения в магистрально-модульных ИВЭП применяется „смешанное резервирование“. При таком резервировании (рис. 4) основные каналы (ОК) и один резервный канал (РК<sub>К+1</sub>) находятся в режиме работы, а  $K$  остальных резервных каналов — в режиме ожидания. Другими словами, смешанное резервирование в данном случае представляет собой группу „скользящее ненагруженное резервирование“, в которой каналы группы „скользящее нагруженное резервирование“ вида  $N$  из  $(N+1)$ , выделенной на рис. 4 пунктиром, зарезервированы  $K$  каналами в режиме ожидания.

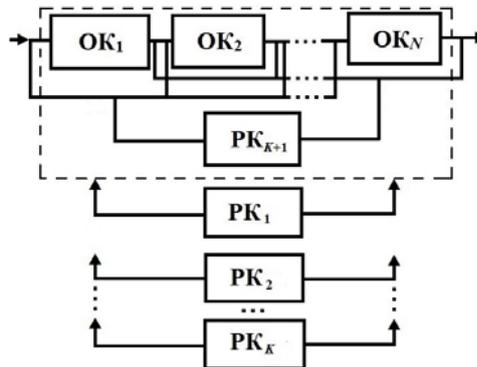


Рис. 4

В отличие от „классического“ ненагруженного резервирования СЧ ИВЭП, при котором в момент переключения с отказавшего канала на резервный возможно снижение качества электроснабжения потребителей, при смешанном резервировании этого не происходит, так как число работоспособных каналов, обеспечивающих необходимое качество, остается неизменным.

Критерием отказа такой группы является отказ  $N$  основных каналов, одного резервного и любого канала из оставшихся работоспособных. Особенность функционирования силовых каналов в СЧ ИВЭП при таком способе резервирования заключается в том, что нагрузка на каналы, находящиеся в режиме работы, будет неизменной и равной

$$K_H = \frac{\lambda_o (N+1)}{\lambda_{\text{НОМ}}}. \quad (13)$$

После отказа  $(K+1)$ -го канала нагрузка оставшихся работоспособных каналов возрастет до номинальной. Также резервные каналы могут отказаться и в режиме ожидания, и в момент их подключения.

Кроме рассмотренных выше, в работе [3] предложен способ резервирования вида  $N+1+K$  с „ротацией“ силовых каналов (рис. 5).

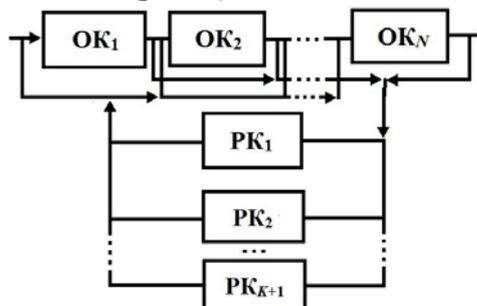


Рис. 5

Так же как и при ненагруженном резервировании с ротацией (см. рис. 3), при данном способе каждый из каналов периодически переключается из режима работы в режим ожидания

и наоборот, силовые каналы относятся к изделиям МКЦП, для которых необходимо учитывать отказы при переключениях и отказы каналов в режиме ожидания, причем значение  $K_{и.э}$  тоже зависит от числа работоспособных каналов и определяется как

$$K_{и.э_k} = \frac{N+1}{N+1+k} \text{ при } k = 0, 1, 2, \dots, K. \quad (14)$$

Так же как и при смешанном резервировании, нагрузка на каналы, находящиеся в режиме работы, будет неизменной до тех пор, пока не откажет  $(K+1)$ -й канал, а затем у оставшихся работоспособных каналов нагрузка возрастет до номинальной.

Следует отметить, что в приведенных в гос. стандарте\* формулах для расчета вероятности безотказной работы РЭУ  $P(t)$  по ССН „скользящее нагруженное резервирование“ и „скользящее ненагруженное резервирование“ не учитываются рассмотренные выше особенности функционирования силовых каналов в СЧ ИВЭП, а методики расчета  $P(t)$  по ССН „скользящее ненагруженное резервирование с ротацией“, „смешанное резервирование“ и „смешанное резервирование с ротацией“ в стандарте не приводятся.

Основное достоинство смешанного резервирования с ротацией, как указано в [3], заключается в том, что чередование работы каналов способствует равномерному расходованию их ресурса, что увеличивает длительность безотказной работы ИВЭП, повышая тем самым его надежность. Поэтому далее рассмотрим порядок расчета надежности СЧ ИВЭП для этого способа резервирования.

Количественные данные о надежности ИВЭП, позволяющие оценить степень увеличения вероятности  $P(t)$  при таком резервировании, в [3] не приводятся, но в работе [4] представлен график, показывающий, что ротация силовых каналов существенно увеличивает  $P(t)$  СЧ ИВЭП по сравнению с другими способами резервирования.

В развитие этого подхода в работах [5, 6] предложен „структурный метод расчета показателей безотказности“. Следует отметить, что величина  $P(t)$  зависит от значения  $\tau$ . Поэтому при постоянном  $\tau$  возникает и задача его расчета. В патенте [3] такая задача не рассматривалась (рекомендовано значение  $\tau$ , равное 24 ч), тогда как упомянутый выше метод позволяет построить зависимость верхней ( $P_v$ ) и нижней ( $P_n$ ) границ величины  $P(t)$  от  $\tau$  при экспоненциальной модели отказов каналов (рис. 6) [6].

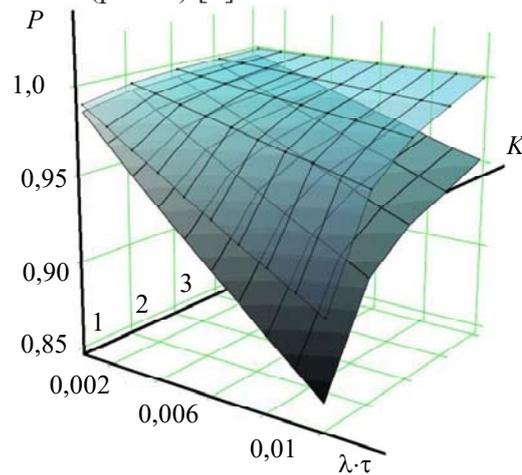


Рис. 6

По этой зависимости и выбирается значение  $\tau$ , которое обеспечит требуемый уровень безотказности СЧ ИВЭП. Также в [6] предложено определять  $\tau$  не только для начального значения  $K$ , но и для  $K-1$ ,  $K-2$  и т.д. (см. рис. 6), и использовать эти значения для управления периодом ротации каналов при эксплуатации ИВЭП. Развитие этой идеи нашло воплощение в

\* ГОСТ 27.003-2016.

работе [7], где предложен способ управления ротацией каналов, основанный на расчете  $\tau$  непосредственно в ходе эксплуатации конкретного образца ИВЭП.

Как видно из рис. 6, при использовании метода ротации [5, 6] не только увеличение  $K$ , но и снижение  $\tau$  существенно влияют на повышение  $P_B$  и  $P_H$ . Так, для резервирования 5+1+1 снижение  $\tau$  в 6,7 раза приводит к повышению  $P_B$  с 0,91 до 0,99.

Для сравнения найдем величину  $P_H$  без ротации каналов. Подставив  $P_B=0,99$  в формулу (8) и решив ее относительно  $t$  при  $\lambda_c=50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ , получим 1463 ч, а затем для этого значения  $t$  рассчитаем  $P_H$ . При  $K_{и.э.}=6/7$  из формулы (3) найдем  $\lambda_p=58,333 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$  и по формуле (8) получим  $P_H=0,985$ , что значительно больше не только нижней границы, но и верхней (см. рис. 6). Поэтому достоверность приведенных в работах [4–6] результатов, касающихся не только степени влияния  $\tau$  на  $P(t)$  СЧ ИВЭП, но и преимуществ резервирования с ротацией по сравнению с другими способами, вызывает определенные сомнения.

Для оценки эффективности способов резервирования СЧ ИВЭП была разработана специализированная программа [8], в которой для расчета вероятности безотказной работы был использован метод статистического моделирования, рекомендованный гос. стандартом\* как универсальный метод расчета показателей надежности. В программе использована универсальная формальная модель [9], позволяющая рассчитывать время до отказа СЧ ИВЭП на основе экспоненциальной модели отказов каналов для рассмотренных способов резервирования. При этом возможно учитывать изменения коэффициентов нагрузки каналов при их отказах, отказы каналов в режиме ожидания и при их подключениях/переключениях как при постоянном/переменном периоде ротации, так и при автоматическом управлении периодом ротации. Скриншот интерфейса программы показан на рис. 7.

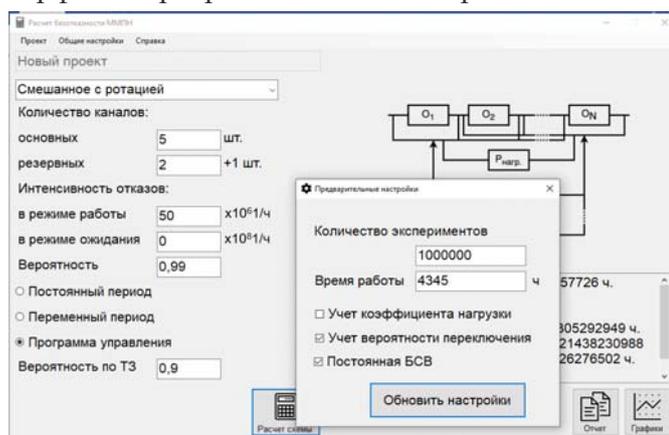


Рис. 7

Для получения сопоставимых результатов эта программа была использована при анализе эффективности применения различных способов резервирования. В таблице приведены результаты расчетов вероятности  $P(t)$  безотказной работы СЧ ИВЭП за время  $t=4345$  ч при  $\lambda_p=50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_x=0$ ,  $K_H=1$  и  $P_{вкл.}=P_H=1$ .

№ п/п	Способ резервирования	$P(t), P_B(t)$	Примечание
1	Скользящее нагруженное 5 из 7	0,860046	
2	Скользящее ненагруженное 5 из 7	0,903105	
3	Скользящее ненагруженное 5 из 7 с ротацией	0,902946	$\tau=24$ ч
4	Скользящее ненагруженное 5 из 7 с ротацией	<b>0,933599</b>	$K_{и.э.}=6/7$
5	Смешанное 5+1+1	0,873907	
6	Смешанное 5+1+1 с ротацией	0,873843	$\tau=24$ ч
7	Смешанное 5+1+1 с ротацией	<b>0,899589</b>	$K_{и.э.}=6/7$

\* ГОСТ 27.301-95.

Как видно из таблицы, увеличение времени до отказа каналов за счет ротации повышает  $P(t)$  по сравнению с нагруженным резервированием, но не дает никакого выигрыша по сравнению с резервированием без ротации. На первый взгляд, это кажется парадоксальным, поэтому нуждается в пояснении. На рис. 8 приведен пример формирования итогового времени до отказа ( $t_{\text{ИВЭП}}^{\text{отк}}$ ) СЧ ИВЭП при смешанном резервировании вида 2+1+1 с ротацией по реализациям наработок силовых каналов.

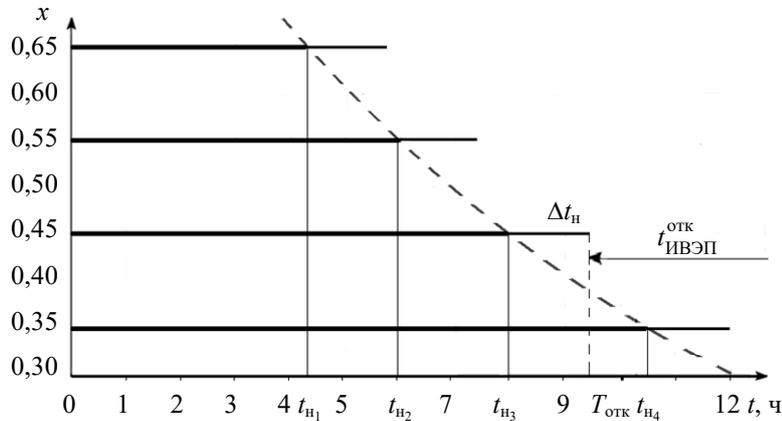


Рис. 8

Как видно из рис. 8, только при условии, что в режиме ожидания находится 4-й канал, время до отказа СЧ ИВЭП при смешанном резервировании без ротации ( $t_{\text{ИВЭП}}^{\text{отк}} = t_{н3}$ ) будет меньше, чем с ротацией ( $t_{\text{ИВЭП}}^{\text{отк}} = t_{н3} + \Delta t_{н}$ ). Другими словами, при экспоненциальной модели отказов каналов снижение  $\tau$  приводит к росту  $t_{\text{ИВЭП}}^{\text{отк}}$  за счет повышения эффекта от ротации, а увеличение  $\tau$  также приводит к росту  $t_{\text{ИВЭП}}^{\text{отк}}$ , но за счет повышения эффекта от ненагруженного резерва.

Таким образом, при смешанном резервировании ротация и ее параметры влияют на величину  $P(t)$  СЧ ИВЭП только при определенном сочетании значений наработок основных и резервных каналов, а поскольку эти значения заранее не известны, то априори утверждать, что для конкретного образца ИВЭП смешанное резервирование с ротацией всегда лучше, чем без нее, невозможно. Мало того, если учесть, что  $P_{п} < 1$ , то, например, при тех же значениях  $t$ ,  $\lambda$ ,  $\tau$ ,  $K_{п}$  и  $P_{п} = 0,99$  для резервирования вида 5+1+2 без ротации получим  $P(t) = 0,960481$ , а с ротацией —  $P(t) = 0,84094$ , что значительно хуже (для сравнения, использование способа [7] для управления ротацией дает  $P(t) = 0,962077$ ).

Тем не менее для восстанавливаемых ИВЭП использование смешанного резервирования с ротацией позволит снизить эксплуатационные затраты за счет перехода от непрерывного технического обслуживания (ТО) к периодическому. При ротации порядок отказов каналов такой же, как и при нагруженном резервировании, но время до отказа каналов возрастает (см. рис. 8), что увеличивает и среднее время до отказа допустимого числа каналов в ИВЭП. Это позволяет определить такой период ТО (замена отказавших каналов и восстановление надежности остальных), который обеспечит требуемый уровень готовности СЧ ИВЭП в течение всего срока эксплуатации.

В этом плане использование способа [7] для управления ротацией при смешанном резервировании с  $P_{п} < 1$  дает существенное увеличение среднего времени до отказа каналов по сравнению со способом, основанным на априорной оценке периода ротации  $\tau$  (как постоянного [3, 5], так и переменного [6]).

Что касается ротации основных и резервных узлов в РЭУ, то она может дать гарантированный эффект при условии, что реализации их наработок будут одного порядка, т.е.

$$t_{H_{\min}} \approx t_{H_i} \rightarrow M(t_H), \quad (15)$$

где  $M(t_H)$  — математическое ожидание наработки узла.

Практика расчетов надежности моделей отказов РЭФУ показывает, что для выполнения условия (15) наиболее приемлемыми являются нормальное распределение с коэффициентом вариации ( $v$ ), меньшим  $0,25^*$ , или близкие к нему, например,  $\alpha$ -распределение [10].

На рис. 9 приведен пример формирования итогового времени до отказа РЭУ ( $t_{РЭУ}^{\text{отк}}$ ) при смешанном резервировании вида 2+1+1 с ротацией по реализациям наработок узлов при  $M(t_H)=T_{\text{отк}}$  и  $v=0,2$ .

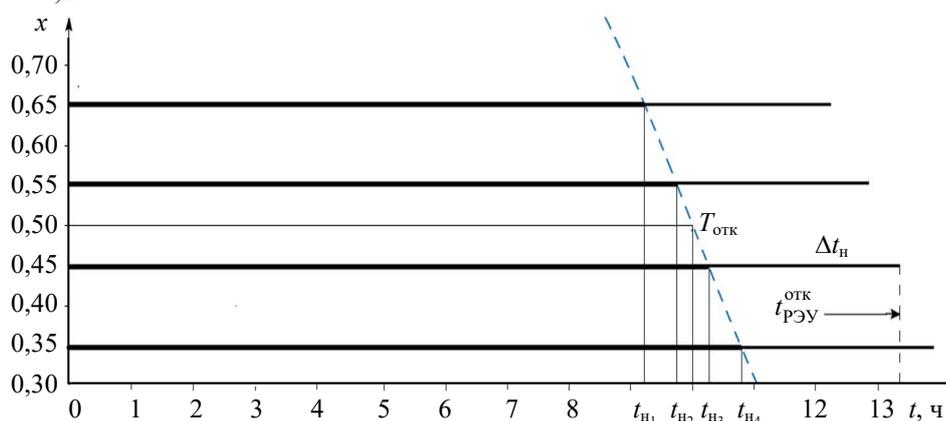


Рис. 9

Как видно из рис. 9 для нормального распределения наработки РЭФУ даже максимальное время до отказа РЭУ при смешанном резервировании без ротации ( $t_{РЭУ}^{\text{отк}}=t_{H_4}$ ) меньше, чем с ротацией ( $t_{РЭУ}^{\text{отк}}=t_{H_3}+\Delta t_H$ ).

Таким образом, основной научный результат исследования заключается в том, что при смешанном резервировании СЧ ИВЭП ее безотказность определяется не только наличием ротации силовых каналов и ее параметрами ( $\tau$  и  $P_H$ ), но и зависимостью от вида модели отказа канала (функции распределения наработки).

Кроме того, на основании вычислительных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- смешанное резервирование с ротацией позволяет повысить вероятность безотказной работы СЧ ИВЭП по сравнению со скользящим нагруженным резервированием;
- для экспоненциальной модели отказов канала уменьшение  $\tau$  слабо влияет на повышение вероятности безотказной работы СЧ ИВЭП при смешанном резервировании;
- для конкретного образца ИВЭП при экспоненциальной модели отказов канала заранее невозможно определить, какое резервирование СЧ ИВЭП даст больший эффект в повышении  $P(t)$  — с ротацией и без нее;
- применение смешанного резервирования с ротацией для восстанавливаемых ИВЭП позволяет снизить эксплуатационные затраты за счет перехода от непрерывного технического обслуживания к периодическому.

Относительно гарантированного эффекта от ротации в РЭУ, то он может быть получен, если модель отказов РЭФУ — распределение, близкое к нормальному с  $v < 1$ , а максимальный эффект от ротации достигается при  $v \rightarrow 0$ ,  $\tau \rightarrow 0$  и  $P_H \rightarrow 1$ .

\* ГОСТ 27.005-97.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-14-24.
2. Zhadnov V. V., Polesskiy S. N. Determination of the fail-safety of multichannel voltage converters with power-channel rotation // Russian Electrical Engineering. 2020. Vol. 91, N 7. P. 262—267. DOI: 10.3103/S1068371220040100.
3. Пат. 1804678 РФ. Способ управления группой источников вторичного электропитания (ИВЭ), подключенных параллельно на общую шину нагрузки / Ю. Н. Либенко, В. А. Ротаренко. Опубл. 23.03.1993. Бюл. № 11.
4. Либенко Ю. Н., Четин А. Н. Пути повышения безотказности систем вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры // Электропитание. 2010. № 4. С. 10—21.
5. Четин А. Н. Применение метода ротации силовых каналов для повышения безотказности многоканального преобразователя напряжения // Практическая силовая электроника. 2013. № 49 (1). С. 33—36.
6. Четин А. Н. Методы повышения безотказности централизованной части системы вторичного электропитания аппаратуры вычислительной техники: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2018.
7. Пат. № 2724928 С1 РФ. Способ управления ротацией силовых каналов в магистрально-модульном преобразователе напряжения со смешанным резервированием / В. В. Жаднов. 26.06.2020.
8. Lukina A. S., Tselischev I. S. Development of a software model of redundancy with rotation for a multi-channel voltage converter // Information Innovative Technologies: Materials of the Intern. Sci.-Pract. Conf. Prague, 2020. P. 99—106.
9. Жаднов В. В. Модель магистрально-модульного преобразователя напряжения для расчета его наработки до отказа методом статистического моделирования при смешанном резервировании его каналов // Надежность и качество: Тр. Междунар. симп. Пенза, 2020. Т. 1. С. 52—55.
10. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных систем. М.: Энергия, 1977. 536 с.

*Сведения об авторах*

- Валерий Владимирович Жаднов** — канд. техн. наук, доцент; НИУ „Высшая школа экономики“, департамент электронной инженерии; E-mail: vzhadnov@hse.ru
- Арина Сергеевна Лукина** — студентка; НИУ „Высшая школа экономики“, департамент компьютерной инженерии; E-mail: aslukina\_4@edu.hse.ru
- Иван Сергеевич Целищев** — студент; НИУ „Высшая школа экономики“, департамент компьютерной инженерии; E-mail: istselischev@edu.hse.ru

Поступила в редакцию  
04.04.2021 г.

**Ссылка для цитирования:** Жаднов В. В., Лукина А. С., Целищев И. С. Оценка эффективности способов резервирования магистрально-модульных источников вторичного электропитания // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 9. С. 741—751.

**EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF REDUNDANCY METHODS  
FOR LINE MODULAR SOURCES OF SECONDARY POWER SUPPLY**

**V. V. Zhadnov, A. S. Lukina, I. S. Tselishchev**

*HSE University, 101000, Moscow, Russia  
E-mail: vzhadnov@hse.ru*

The issues of ensuring operational reliability of modular sources of secondary power supply by applying redundancy of their power channels are considered. Methods of the theory of reliability and simulation are used. An analysis of main ways of redundancy of modular secondary power supply sources (loaded, unloaded, mixed) and the features of their power channels functioning (time schedules of channel operation, change in the load of operating channels, channel failures during their switching) is presented. With the use of a specialized program implementing the Monte Carlo method, computational experiments

are carried out to assess the probability of failure-free operation with various methods of redundancy. It is shown that for a modular secondary power supply source, it is impossible to pre-assign a redundancy method providing the highest probability of failure-free operation, since the same method can give both better and worse results in comparison with other methods of redundancy, depending on the power channels functioning. Based on presented analysis of obtained results, conclusions are drawn about the effectiveness of various redundancy methods and recommendations for their application are given.

**Keywords:** secondary power supplies, reliability trouble-free, power channel, redundancy, probability of failure-free operation

#### REFERENCES

1. Karagodin V.V., Polyansky K.A., Gorin V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 1(60), pp. 14–24. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-1-14-24>. (in Russ.)
2. Zhadnov V.V., Poleskiy S.N. *Russian Electrical Engineering*, 2020, no. 7(91), pp. 262–267. <https://doi.org/10.3103/S1068371220040100>.
3. Patent USSR 1804678, *Sposob upravleniya gruppoy istochnikov vtorichnogo elektropitaniya (IVE), podklyuchennykh parallel'no na obshchuyu shinu nagruzki* (Method of Controlling a Group of Secondary Power Supply Sources (IVE) Connected in Parallel to a Common Load Bus), Yu.N. Libenko, V.A. Rotarenko, Published 09.10.92. (in Russ.)
4. Libenko Yu. N., Chetin A.N. *Elektropitaniye*, 2010, no. 4, pp. 10–21. (in Russ.)
5. Chetin A.N. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2013, no. 1(49), pp. 33–36. (in Russ.)
6. Chetin A.N. *Metody povysheniya bezotkaznosti tsentralizovannoy chasti sistemy vtorichnogo elektropitaniya apparatury vychislitel'noy tekhniki* (Methods for Increasing the Reliability of the Centralized Part of the Secondary Power Supply System of Computer Equipment), Candidate's thesis, Moscow, 2018, 157 p. (in Russ.)
7. Patent RU 2724928 C1, *Sposob upravleniya rotatsiyey silovykh kanalov v magistral'no-modul'nom preobrazovatele napryazheniya so smeshannym rezervirovaniyem* (A Method for Controlling the Rotation of Power Channels in a Bus-Modular Voltage Converter with Mixed Redundancy), V.V. Zhadnov, Patent application no. 2019116108, Priority 24.05.2019, Published 26.06.2020. (in Russ.)
8. Lukina A.S., Tselishchev I.S. *Information Innovative Technologie*, Materials of the International Scientific-Practical Conference, Prague, 2020, pp. 99–106.
9. Zhadnov V.V. *Nadezhnost' i kachestvo. Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma. Tom 1* (Reliability and quality. Proceedings of the International Symposium. Volume 1), Penza, 2020, pp. 52–55. (in Russ.)
10. Druzhinin G.V. *Nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem* (Reliability of Automated Systems), Moscow, 1977, 536 p. (in Russ.)

#### Data on authors

- Valery V. Zhadnov** — PhD, Associate Professor; HSE University, School of Electronic Engineering; E-mail: [vzhadnov@hse.ru](mailto:vzhadnov@hse.ru)
- Arina S. Lukina** — Student; HSE University, School of Computer Engineering; E-mail: [aslukina\\_4@edu.hse.ru](mailto:aslukina_4@edu.hse.ru)
- Ivan S. Tselishchev** — Student; HSE University, School of Computer Engineering; E-mail: [istselishchev@edu.hse.ru](mailto:istselishchev@edu.hse.ru)

**For citation:** Zhadnov V. V., Lukina A. S., Tselishchev I. S. Evaluating the effectiveness of redundancy methods for line modular sources of secondary power supply. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 9. P. 741—751 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-9-741-751