

**ПОРІВНЯННЯ СТРАТЕГІЙ ПРОФІЛАКТИЧНОГО ТА
АВАРІЙНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛА БЕЗПЕРЕБІЙНОГО
ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ**

*Волочій Б. Ю., д.т.н. професор; Кузнєцов Д. С., аспірант
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*

**COMPARISON OF STRATEGIES OF PREVENTIVE AND CORRECTIVE
MAINTENANCE OF UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY**

*Volochiy B., Doctor of Engineering, Professor
Kuznetsov D., PhD, Associate Professor
Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine*

Вступ

Необхідність проектувати джерела безперебійного електроживлення (ДБЕЖ) обумовлена тим, що простій у роботі по причині відсутності електроживлення для радіоелектронних засобів різного типу веде до матеріальних втрат [1]. Тому надійності ДБЕЖ приділяється велика увага. У ряді публікацій [1, 2] визначаються вимоги до надійності ДБЕЖ та подаються рекомендації щодо її забезпечення. Одним з найпоширеніших способів забезпечення високої надійності ДБЕЖ є їх проектування у вигляді відмовостійкої системи (ВС) з відповідною конфігурацією. В практиці поширення набули конфігурації ВС, в яких використано комбіноване структурне або змішане резервування. Реалізація комбінованого структурного резервування в ДБЕЖ передбачає поєднання у одній ВС козовного і загального заміщувального резервувань, а реалізація змішаного резервування в ДБЕЖ передбачає поєднання навантажувального та загального заміщувального резервувань [3]. Разом з цим для забезпечення високого рівня надійності ДБЕЖ передбачено їх технічне обслуговування (ТО), яке може забезпечуватися стратегіями планово-профілактичного та аварійного відновлення або їх поєднанням.

Експериментально визначені показники надійності будуть давати достовірний результат лише при тривалій експлуатації великої кількості однотипних ДБЕЖ. Тому актуальною залишається задача визначення прогнозованих показників надійності ВС для ДБЕЖ вже на етапі їх проектування. Необхідність визначення показників надійності не експериментальним шляхом та проблеми пов'язані зі складністю надійнісних моделей відмовостійких систем часто приводять до аналізу надійності відмовостійких систем за допомогою спрощених моделей, які, як правило, дають не достовірні значення показників надійності.

Постановка задачі

При надійнісному проектуванні відмовостійкої системи для ДБЕЖ вирішуються наступні задачі:

- вибирається конфігурація ВС для ДБЕЖ (види резервування, методи контролю та діагностики, тип перемикача);
- визначаються параметри вибраної конфігурації відмовостійкої системи та її складових для забезпечення заданих значень показників надійності ДБЕЖ;
- визначаються параметри технічного обслуговування, при яких забезпечуються задані значення показників надійності ДБЕЖ.

В даній статті в якості показників надійності ДБЕЖ служать ймовірність безвідмовної роботи на заданому інтервалі часу експлуатації та середнє значення тривалості безвідмовної роботи.

При виборі відповідних параметрів роботи служби ТО різні варіанти реалізації конфігурації ВС для ДБЕЖ можуть забезпечувати однакові середні значення тривалості безвідмовної роботи ДБЕЖ. Проте значення ймовірності безвідмовної роботи у кожного з цих варіантів на заданому інтервалі часу експлуатації ДБЕЖ можуть суттєво відрізнятись.

Тому є необхідність у проведенні аналізу для кожної окремої реалізації ВС з множини альтернативних варіантів реалізацій ВС для ДБЕЖ і визначення кращої шляхом їх порівняння.

Метою дослідження є порівняння альтернативних варіантів реалізації ВС для ДБЕЖ за показником «ймовірність безвідмовної роботи на заданому інтервалі часу експлуатації», при умові що показник «середнє значення тривалості безвідмовної роботи» для всіх варіантів є однаковим. В склад ДБЕЖ входять блок живлення, що містить модулі основної конфігурації, модулі постійного навантаженого резерву з перерозподілом навантаження при відмові модуля, акумулятори, які забезпечують загальне заміщувальне резервування блоку живлення, та засоби контролю і діагностики [5].

Вирішення вищезазначеної задачі є можливим при наявності у розпорядженні проектанта надійнісних моделей для кожної з ВС, які підлягають аналізу. За допомогою таких моделей проектант повинен отримувати кількісні оцінки показників надійності обраного для аналізу варіанту ВС. Ступінь адекватності таких моделей має визначатись тим, що в них має бути враховано структуру ВС, її поведінку при появі відмови та стратегію ТО.

Одним з відомих методів аналізу надійності складних систем є метод простору станів, який полягає в розробці надійнісної моделі ВС у вигляді графа станів та переходів. Розробку графа слід проводити уникаючи укрупнення станів, що підвищує ступінь адекватності моделі. Причиною зниження ступеня адекватності надійнісних моделей ВС, розроблених з використанням методу простору станів, є припущення про експоненційний закон розподілу для усіх випадкових величин, які враховані в моделі ВС. Це

обмеження накладається теорією марковських процесів, що в свою чергу спрощує подальші розрахунки показників надійності. Однак, таке припущення є некоректним для тривалостей процесів відновлення працездатності блоку живлення, заряджання та розряджання акумуляторів.

Тому, задача розробки надійніших моделей ВС, в яких застосовано змішане резервування, з вищим, ніж у відомих моделях, ступенем адекватності, в яких враховано структуру і поведінку ВС та ТО, а також реальні закони розподілу для тривалостей відповідних випадкових процесів є актуальною і потребує свого вирішення.

Опис об'єкту дослідження

Типова узагальнена конфігурація ВС для ДБЕЖ подана в [4]. Одною з найбільш поширених в практиці є її модифікація - конфігурація ВС (N+M). Така ВС включає в себе: блок живлення (БЖ) з модульною структурою, де N — кількість однотипних модулів необхідних для забезпечення живлення номінального навантаження, а M — кількість надлишкових модулів (забезпечують навантажувальне резервування), два акумулятори, (забезпечують загальне заміщувальне резервування блоку живлення), а також засоби контролю та діагностики (забезпечують контроль працездатності модулів блоку живлення, а також контроль працездатності і ступінь розряджання акумуляторів).

Після відмови блоку живлення радіоелектронна система переходить на роботу від акумуляторів. Акумулятори завжди перебувають у зарядженому стані, так як вони включені у буферному режимі до блоку живлення. Тому, при відмові БЖ, переключень акумулятора на навантаження не відбувається, що усуває проблему, обумовлену ненадійністю перемикачів. Для ДБЕЖ передбачено технічне обслуговування, під час якого виконується заміна несправних модулів блоку живлення та акумуляторів. В розроблених моделях враховані стратегії аварійного відновлення (АВ) і планово-профілактичного відновлення (ППВ).

Джерело безперебійного електроживлення перебуває в працездатному стані, коли кількість працездатних модулів блоку живлення більша або рівна N, або є хоча б один працездатний заряджений акумулятор.

Надійнісні моделі відмовостійкої системи з конфігурацією N+M для джерела безперебійного електроживлення

Для того, щоб провести порівняння показників надійності розроблено дві надійнісні моделі ВС з конфігурацією N+M за удосконаленою технологією моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем [4]. Моделі відрізняються стратегіями ТО. В одній моделі закладено планово-профілактичне відновлення ДБЕЖ, а в другій — аварійне відновлення. При створенні аналітичних моделей ВС були розроблені моделі-посередники у вигляді графів станів і переходів. Після цього відповідно до розроблених графів були сформовані системи диференційних рівнянь Колмогорова -

Чепмена, розв'язки яких дозволяють визначати необхідні показники надійності.

Задача побудови графів для всіх варіантів реалізації ВС, що підлягають аналізу, та задача знаходження розв'язків відповідних їм систем диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена вирішені за допомогою програмного модуля ASNA-1. Для роботи з програмним модулем здійснена розробка структурно-автоматної моделі ВС [6], яка є формалізованим представленням об'єкту дослідження. Розробка структурно-автоматної моделі ВС виконується в такій послідовності. Спочатку формується вербальна модель, в якій описується вся необхідна інформація про ВС. Потім вибираються параметри, які потрібно представити у моделі ВС, а також визначаються компоненти вектора стану, який буде однозначно представляти всю сукупність реальних станів ВС. Після цього формується дерево правил модифікації компонент вектора стану, що передбачає вирішення задач:

- визначення множини базових подій, які будуть мати місце при експлуатації ДБЕЖ;
- формалізований опис ситуацій, в яких відбуваються базові події;
- компонування формул розрахунку інтенсивностей базових подій;
- компонування формул розрахунку ймовірностей альтернативних переходів;
- формування правил модифікації компонент вектора стану, що показують, як змінюється стан ВС після настання базової події;
- формування критерію критичної відмови.

Згідно методики, поданої в статті [5], в дерево правил модифікації введені компоненти, які забезпечують формування надійнісної моделі ВС з законом розподілу Ерланга для тривалостей процесів відновлення працездатності ДБЕЖ, заряджання та розряджання акумуляторів.

Задача формування вектора стану вирішена наступним чином:

V1 — відображає поточну кількість працездатних модулів в блоці живлення (початкове значення компоненти $V1$ дорівнює сумарній початковій кількості модулів в робочій конфігурації блоку живлення і в резерві $(N+M)$); **V2** — відображає поточну кількість працездатних заряджених акумуляторів (початкове значення рівне K_A); **V3** — відображає поточну кількість акумуляторів, що перебувають на заряджанні (початкове значення рівне 0); **V4** — можливість відновлення акумуляторів (1 — відновлення можливе, 0 — усі заплановані відновлення виконані (початкове значення рівне 1)); **V5** — можливість відновлення модуля БЖ (1 — відновлення можливе, 0 — усі заплановані заміни виконані (початкове значення рівне 1)); **V6** — представляє етап планово-профілактичного відновлення (0 — етап очікування, 1 — проведення відновлення (початкове значення рівне 0)).

В моделі ВС враховані наступні параметри ДБЕЖ:

- параметри блоку живлення: N — початкова кількість модулів в ро-

бочій конфігурації блоку живлення; M — початкова кількість модулів резерву; λ_{BM} — інтенсивність відмов одного модуля в блоці живлення; K_H — поправочний коефіцієнт для інтенсивності відмов, який враховує вплив навантаження;

- параметри акумуляторів: S_C — максимальна кількість циклів заряд-розряд акумулятора; T_{3A} — середнє значення тривалості заряджання акумулятора; λ_{PFA} - інтенсивність розряду працюючого акумулятора; λ_{BA} — інтенсивність відмов акумулятора; K_A — кількість акумуляторів;

- параметри технічного обслуговування: S_P — кількість запланованих ТО; T_{II} — середнє значення періодичності ТО ДБЕЖ при планово-профілактичному відновленні; T_{TO} — середнє значення часу відведеного на проведення ТО ДБЕЖ; T_{PM} — середнє значення тривалості заміни модуля чи акумулятора при аварійному відновленні (включає затрати часу на формування бригади і прибуття до об'єкту); S_A — максимальна кількість заміन несправних акумуляторів.

Розроблені структурно-автоматні моделі ВС дозволяють отримати графи станів та переходів і відповідно аналітичні моделі ВС у вигляді систем диференціальних рівнянь Колмогорова - Чепмена для всіх варіантів реалізації ВС, які підлягають порівняльному дослідженню. Тут наводимо одну аналітичну модель ВС з конфігурацією $N+0$ і з аварійним відновленням, яка має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -P_1(t) \times (N \times \lambda_{AI}) - P_1(t) \times \left(\left(\frac{\lambda_{DIA}}{K_a} \right) \left(\frac{S_c - 1}{S_c} \right) \right) - P_1(t) \times \left(\left(\frac{\lambda_{DIA}}{K_a} \right) \left(\frac{1}{S_c} \right) \right) - \\ &- P_1(t) \times (V_3 \times \lambda_{AA}) + P_2(t) \times \left(\frac{1}{T_{DI}} \times \frac{S_p - 1}{S_p} \right) + P_3(t) \times \frac{1}{T_{CA}} \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= +P_1(t) \times (N \times \lambda_{AI}) - P_2(t) \times (N \times \lambda_{AI}) - P_2(t) \times \left(\frac{\lambda_{DIA}}{V_3} \times \frac{S_c - 1}{S_c} \right) - P_2(t) \times \left(\frac{\lambda_{DIA}}{V_3} \times \frac{1}{S_0} \right) - \\ &- P_2(t) \times (V_3 \times \lambda_{AA}) - P_2(t) \times \left(\frac{1}{T_{DI}} \times \frac{S_p - 1}{S_p} \right) - P_2(t) \times \left(\frac{1}{T_{DI}} \times \frac{1}{S_p} \right) + P_5(t) \times \left(\frac{1}{T_{DI}} \times \frac{S_p - 1}{S_p} \right) + P_6(t) \times \frac{1}{T_{CA}} \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dP_{36}(t)}{dt} &= +P_{34}(t) \times (N \times \lambda_{AI}) - P_{36}(t) \times \left(\frac{\lambda_{DIA}}{V_3} \times \frac{S_0 - 1}{S_0} \right) - P_{36}(t) \times \left(\frac{\lambda_{DIA}}{V_3} \times \frac{1}{S_c} \right) - P_{36}(t) \times (V_3 \times \lambda_{AA}) \end{aligned} \right\}$$

Порівняння надійності джерела безперебійного електроживлення з різними варіантами реалізації відмовостійкої системи

Для порівняльного дослідження сформовано 4 варіанти реалізації ВС для ДБЕЖ, параметри яких подані в табл. 1. Параметри ВС підбрані так, щоб показник надійності "середнє значення тривалості безвідмовної роботи" для I і II, а також III і IV варіантів реалізації ВС мали близькі значення. А саме 58024 год та 58063 год відповідно для I та II варіантів реалізації ВС і 116465 год та 116452 год для III та IV варіантів реалізації ВС.

Таблиця 1.

Параметри відмовостійкої системи для джерела безперебійного електроживлення

№ вар.	N	M	K _H	λ_{BM}^{-1} год	S _Ц	T _{ЗА}	$\lambda_{РПА}^{-1}$ год	$\lambda_{ВА}^{-1}$ год	S _P	S _A	T _n год	T _{ТО} год	T _{PM} год
I (AB)	2	1	1	6e-5	300	0.2	0.33	1e-7	5	5	-	-	1
II (ППВ)	2	2	1	6e-5	300	0.2	0.33	1e-7	5	5	2340	10	1
III (AB)	3	1	1	2e-5	250	0.25	0.5	4e-6	5	5	-	-	3
IV (ППВ)	3	2	1	2e-5	250	0.25	0.5	4e-6	5	5	3852	10	3

За допомогою розроблених моделей ВС отримані залежності ймовірності безвідмовної роботи ДБЕЖ від тривалості його експлуатації, які представлені для I та II варіантів ВС на рис. 1, та для III та IV варіантів ВС на рис. 2.

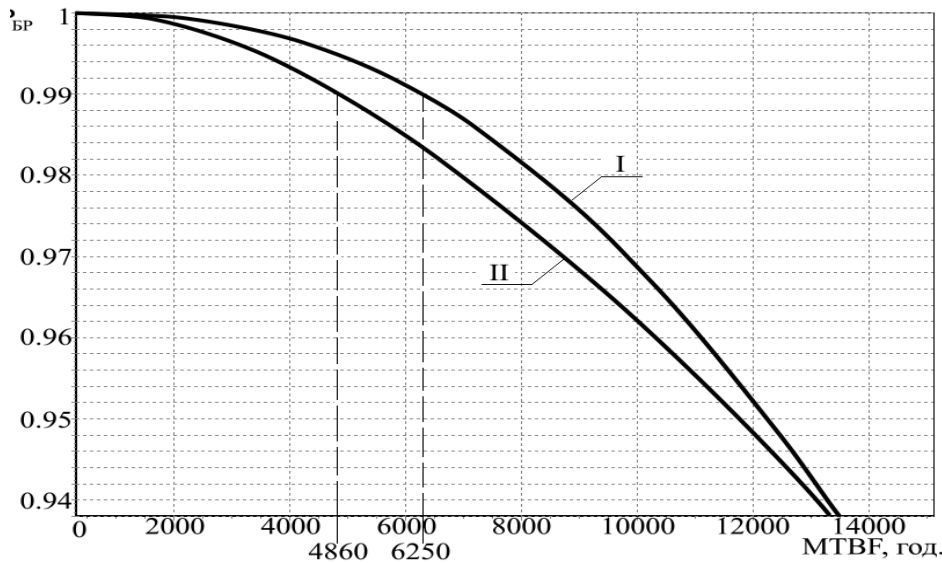


Рис. 1. Залежність ймовірності безвідмовної роботи від тривалості експлуатації для I та II варіантів реалізації відмовостійкої системи для ДБЕЖ

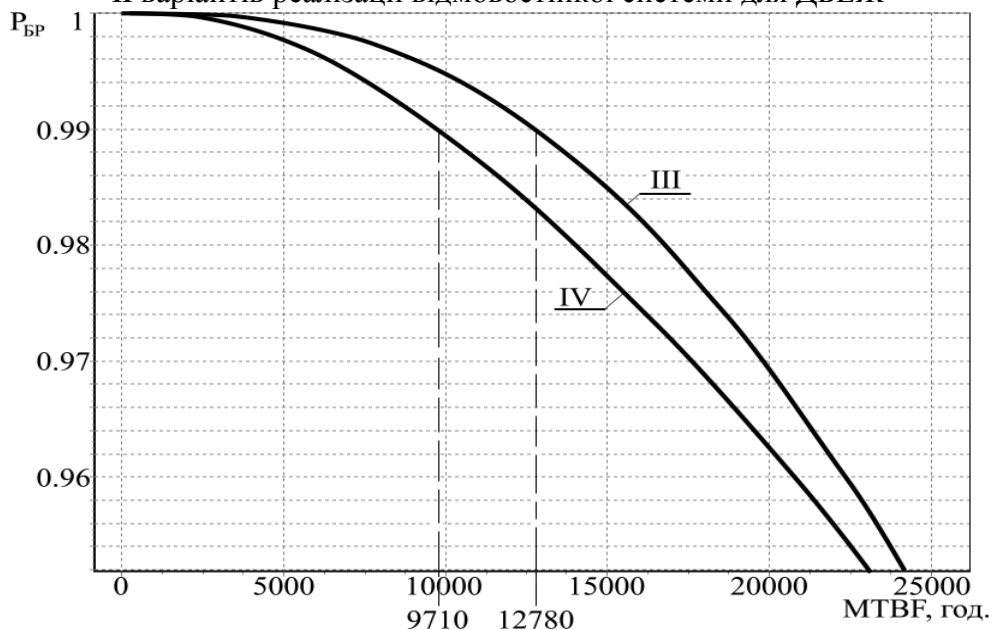


Рис. 2. Залежність ймовірності безвідмовної роботи від тривалості експлуатації для III та IV варіантів реалізації відмовостійкої системи для ДБЕЖ

Критерієм для порівняння варіантів реалізації ВС служить інтервал експлуатації ДБЕЖ, на якому ймовірність безвідмовної роботи має значення не нижче заданої величини, наприклад $P_{БР} \geq 0.99$.

Отже, із рис. 1 та рис. 2 видно, що при порівнянні ВС з конфігурацією N+M інтервал часу, на якому виконується умова $P_{БР} \geq 0.99$ є більшим при використанні стратегії аварійного відновлення, ніж планово-профілактичного відновлення. Часові інтервали, на яких середнє значення тривалості безвідмовної роботи $P_{БР} \geq 0.99$ складають, 4860 год і 6250 год для I і II варіантів, та 9710 год і 12780 год для III і IV варіантів.

Висновки

За допомогою розроблених моделей проведено порівняння показників надійності відмовостійкої системи з стратегіями аварійного та планово-профілактичного відновлення при умові забезпечення однакових середніх значень тривалостей безвідмовної роботи джерела безперебійного електроживлення. Дослідженнями показано, що при заданих параметрах джерела безперебійного електроживлення за умови забезпечення ймовірності безвідмовної роботи $P_{БР} \geq 0.99$ слід віддати перевагу стратегії аварійного відновлення, тому що вона забезпечує виконання цієї умови на більшому інтервалі часу експлуатації. За отриманими результатами стратегія аварійного відновлення в порівнянні з планово-профілактичним відновленням дає вииграш в надійності I варіанту над II на 28,6% та III варіанту над IV на 31,6%.

Література

1. Теория вероятностей: резервирование и время безотказной работы ЦОД — Режим доступу: <http://orbita-80.ru/pages/52/54/>
2. Tier datacenter — уровни надежности дата-центра — Режим доступу: <http://dcnt.ru/?p=22>
3. McCarthy K. Comparing UPS System Design Configurations — APC — 2004. — Режим доступу: http://www.apcmedia.com/salestools/SADE-5TPL8X_R3_EN.pdf
4. Волочій Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем. — Львів: Вид-во Національного ун-ту "Львівська політехніка", 2004. — 220 с.
5. Волочій Б. Ю. Удосконалення технології моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем з використанням методу фаз Ерланга / Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, І. В. Кулик // Вісник Національного технічного університету України "КПІ", Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2012. — № 48. — С. — 159–167.
6. Волочій Б. Ю. Проектування відмовостійких систем з конфігураціями N+M та 2×(N+M) для джерел безперебійного електроживлення / Б. Ю. Волочій, Д. С. Кузнецов // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник НУ «Львівська політехніка» № 738. — Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2012. — С. 216 – 222.

References

1. Teoriia veroiatnosti: rezervirovanie i vremia bezotkaznoi raboty TsOD – Rezhym dostupu: <http://orbita-80.ru/pages/52/54/>
2. Tier datacenter — уровни надеzhnosti data-tsentra – Rezhym dostupu: <http://dcnt.ru/?p=22>

3. McCarthy K. Comparing UPS System Design Configurations – APC – 2004. - Rezhyim dostupu: http://www.apcmedia.com/salestools/SADE-5TPL8X_R3_EN.pdf
4. Volochiy B.Yu. Tekhnologiiia modeliuвання alqorytmiv povedinky informatsiinykh system – Lviv: Vyd-vo Natsionalnoho Universytetu "Lvivska Politekhnika", 2004. – 220 с.
5. Volochiy B.Yu. Udoskonalennia tekhnologii modeliuвання dyskretno-neperervnykh stokhastychnykh system z vykorystanniam metodu faz Erlanga / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovs'kyi, I.V. Kulyk // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "KPI" Serii – Radiotekhnika. Radioaparatabuduvannia - 2012. - № 48. - pp. – 159-167.
6. Volochiy B.Yu. Proektuvannia vidmovostiikykh system z konfiguratsiiamy $N+M$ ta $2 \times (N+M)$ dlya dzherel bezperebiinogo elektrozhivlennia / B.Yu. Volochiy, D.S. Kuznetsov // Radioelektronika ta telekomunikatsii. Visnyk NU «Lvivska politekhnika» № 738. – L'viv: Vyd-vo Natsionalnoho Universytetu «Lvivska politekhnika», 2012. – S. 216 - 222

Волочий Б. Ю., Кузнєцов Д. С. Порівняння стратегій профілактичного та аварійного відновлення джерела безперебійного електроживлення. В роботі виконується порівняння показників надійності двох варіантів реалізації відмовостійкої системи з конфігурацією $N+M$ для джерел безперебійного електроживлення, для яких передбачено планово-профілактичне або аварійне відновлення. При забезпеченні однакових середніх значень тривалостей безвідмовної роботи, вони володіють різними значеннями ймовірності безвідмовної роботи при заданій тривалості експлуатації. Проведення дослідження стало можливим після розробки моделей відмовостійких систем у вигляді систем диференціальних рівнянь Колмогорова - Чепмена.

Ключові слова: джерело безперебійного електроживлення, змішане резервування, відмовостійка система, технічне обслуговування.

Волочий Б. Ю., Кузнєцов Д. С. Сравнение стратегий профилактического и аварийного восстановления источника бесперебойного электропитания. В работе выполняется сравнение показателей надежности двух вариантов реализации отказоустойчивой системы с конфигурацией $N+M$ для источников бесперебойного электропитания, для которых предусмотрено планово-профилактическое или аварийное восстановление. При обеспечении одинаковых средних значений длительностей безотказной работы, они обладают разными значениями вероятности безотказной работы при заданной продолжительности эксплуатации. Проведение исследования стало возможным после разработки моделей отказоустойчивых систем в виде систем дифференциальных уравнений Колмогорова - Чепмена.

Ключевые слова: источник бесперебойного электропитания, смешанное резервирование, отказоустойчивая система, техническое обслуживание.

Volochiy B., Kuznetsov D. The comparison of strategies for preventive and corrective maintenance of uninterruptible power supply.

Introduction. The comparison of the reliability for two variants of the fault-tolerant $N+M$ redundant configurations for uninterruptible power supply with corrective and preventive maintenance is given in this paper.

Formulation of the problem. Different variants of fault-tolerant redundant configurations and maintenance strategies provide equivalent mean time to failure indexes, but at the same time have different values of the probability of failure-free operation at given operation time value.

Description of object under consideration. Fault-tolerant system consists of main and hot reserve modules and has two accumulator batteries.

Reliability model for fault-tolerant system with $N+M$ redundant configuration. Carrying out this research was made possible after the development of fault-tolerant systems models as Kolmogorov - Chapman differential equation systems.

Comparison of the reliability of uninterruptible power supply with different fault-tolerant configurations. The quantitative difference between reliability indexes (operation time where probability of failure-free operation is not less than 0.99) of corrective and preventive maintenance is shown.

Conclusions. Reliability analysis of fault-tolerant systems shows that the strategy of corrective maintenance has higher values of operation time where probability of failure-free operation is not less than 0.99.

***Keywords:** uninterruptible power supply, mixed redundancy, fault-tolerant system*