

УДК 620.004.5

НАДЕЖНОСТЬ ДУБЛИРОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УСТРОЙСТВАМИ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А., студенты МЫСЛЮ Е. Л., ИВАНОВА А. Н.

Белорусский национальный технический университет

Надежность работы ответственных технических систем может обеспечиваться путем структурного резервирования. Наиболее простым и распространенным способом резервирования является дублирование. Возможно активное и пассивное дублирование. Пассивным называется дублирование, при котором отказ одного из элементов не влияет на работу системы. Элементы в этом случае соединяются постоянно, и перестройка схемы при отказе одного из элементов не происходит (рис. 1). При активном резервировании отказавший элемент автоматически заменяется резервным. Перестройка схемы производится дополнительным устройством встроенного контроля (УВК), которое определяет факт отказа основного элемента и подает команду на включение в работу резервного элемента (рис. 2). Практическим примером может служить работа параллельно включенных кабельных или воздушных линий электропередачи.

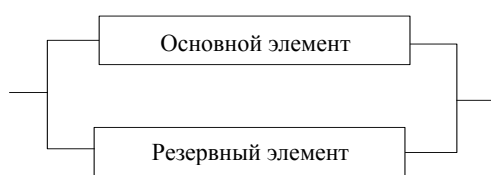


Рис. 1. Логическая схема пассивного дублирования

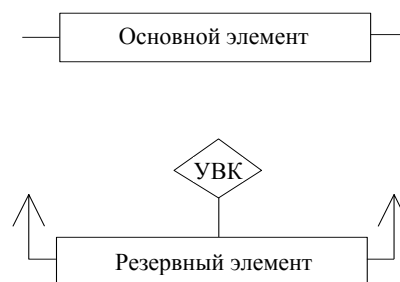


Рис. 2. Логическая схема активного дублирования

Системы пассивного и активного дублирования равнонадежны при идеальном, т. е. абсолютно надежном УВК, и нагруженном резервном элементе в течение всего времени работы системы. Система активного дублирования с идеальным УВК и резервным элементом в ненагруженном или не полностью нагруженном (облегченный резерв) состоянии более надежна

на, чем система пассивного дублирования, так как до момента включения резервного элемента его ресурс остается неизменным или срабатывается меньше, чем в полностью нагруженном состоянии.

Неидеальность УВК снижает надежность активного дублирования. Возникает задача количественного анализа влияния надежности УВК и определения условия предпочтительности того или иного способа дублирования. Сравним системы дублирования по двум основным показателям надежности: вероятности безотказной работы и наработке на отказ.

Вероятность безотказной работы невосстанавливаемой системы пассивного дублирования при экспоненциальном законе надежности статистически независимых и идентичных основным (о. э.) и резервном (р. э.) элементах, когда интенсивность отказов каждого из них $\lambda_{о.э} = \lambda_{р.э} = \lambda = \text{const}$, определяется формулой [1]

$$P_{п}(\lambda t) = 2\exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t). \quad (1)$$

Вероятность безотказной работы невосстанавливаемой системы активного дублирования при ненагруженном режиме резервного элемента и возможном отказе УВК только в момент перестройки схемы определяется следующим образом:

$$P_{а}(\lambda t) = \exp(-\lambda t) (1 + p_k \lambda t), \quad (2)$$

где p_k – вероятность безотказной работы УВК, не зависящая от времени.

Анализ зависимостей (1) и (2), представленных на рис. 3, показывает, что с изменением параметров λt и p_k изменяется предпочтение по показателю вероятности безотказной работы той или иной системы.

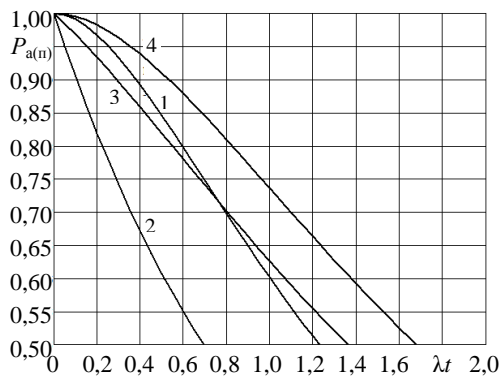


Рис. 3. Вероятность безотказной работы систем: 1 – пассивное дублирование; 2, 3, 4 – активное дублирование (2 – $p_k = 0$; 3 – 0,7; 4 – 1,0)

Выбор системы дублирования следует производить не по точечным значениям вероятности $P(\lambda t)$ в какой-то фиксированный момент времени, а по средним на интервале $(0; \lambda t_{\text{pec}})$ значениям [2, 3]:

$$P_{п,ср}(0, \lambda t_{\text{pec}}) = \frac{1}{\lambda t_{\text{pec}}} \int_0^{\lambda t_{\text{pec}}} P_{п} d(\lambda t); \quad (3)$$

$$P_{a, \text{cp}}(0, \lambda t_{\text{рес}}) = \frac{1}{\lambda t_{\text{рес}}} \int_0^{\lambda t_{\text{рес}}} P_a d(\lambda t),$$

где $t_{\text{рес}}$ – запланированный ресурс эксплуатации системы.

Средние вероятности безотказной работы $P_{п, \text{cp}}(0, \lambda t_{\text{рес}})$ и $P_{a, \text{cp}}(0, \lambda t_{\text{рес}})$, рассчитанные согласно (3), представлены на рис. 4.

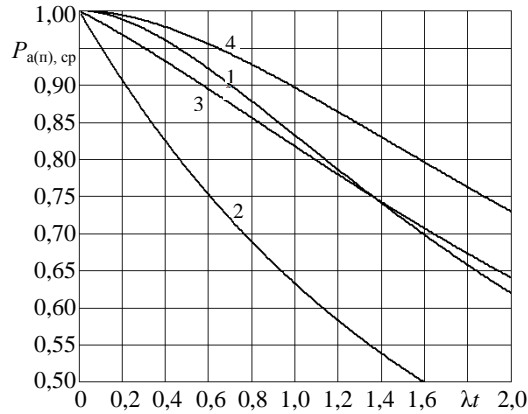


Рис. 4. Средняя вероятность безотказной работы систем:
1 – пассивное дублирование; 2, 3, 4 – активное дублирование
(2 – $p_k = 0$; 3 – 0,7; 4 – 1,0)

Граничное значение вероятности безотказной работы УВК, при превышении которого вероятность безотказной работы системы активного дублирования будет больше вероятности безотказной работы системы пассивного дублирования, – величина переменная и определяется формулой

$$p_{k, \text{гр}} = \frac{1}{\lambda t_{\text{рес}}} \int_0^{\lambda t_{\text{рес}}} 1 - \exp(-\lambda t) d(\lambda t). \quad (4)$$

Зависимость граничной вероятности $p_{k, \text{гр}}$ от $\lambda t_{\text{рес}}$ приведена на рис. 5.

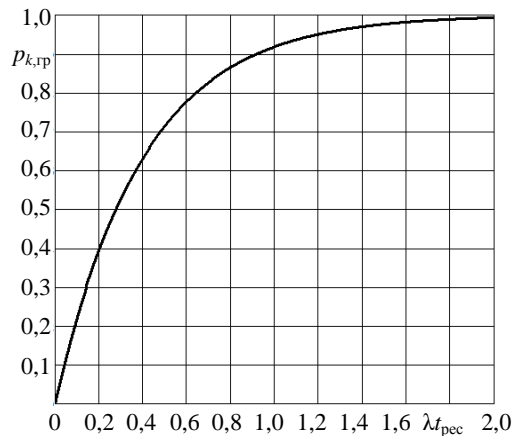


Рис. 5. Граничные значения вероятности безотказной работы УВК

Наработка на отказ невосстанавливаемой системы пассивного дублирования определяется формулой

$$T_{\text{п}} = \int_0^{\infty} P_{\text{п}} dt = \frac{3}{2\lambda}. \quad (5)$$

Наработка на отказ невосстанавливаемой системы активного дублирования

$$T_{\text{а}} = \int_0^{\infty} P_{\text{а}} dt = \frac{1}{\lambda} (1 + p_k). \quad (6)$$

Влияние вероятности безотказной работы УВК на наработку на отказ активной системы показано на рис. 6. Граничное значение вероятности безотказной работы УВК, при превышении которой наработка на отказ активной системы больше наработки на отказ пассивной системы, представляет собой постоянную величину

$$p_{k,\text{гр}} = 0,5 = \text{const}. \quad (7)$$

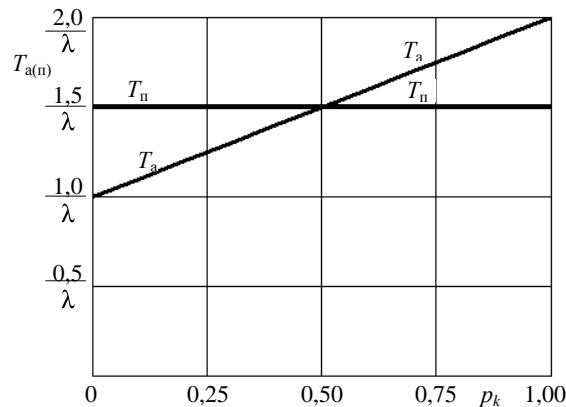


Рис. 6. Нарботки на отказ дублированных систем

Совместное рассмотрение зависимостей (4)–(6) позволяет определить логические условия выбора способа дублирования с учетом как средней вероятности безотказной работы систем, так и их наработки на отказ:

- если $p_k < p_{k,\text{гр}}$ и $p_{k,\text{гр}} < 0,5$, то предпочтительнее по обоим показателям надежности пассивное дублирование;
- если $p_k < p_{k,\text{гр}}$ и $p_{k,\text{гр}} > 0,5$, то предпочтительнее по показателю $P_{\text{ср}}$ пассивное, а по показателю T – активное дублирование;
- если $p_k > p_{k,\text{гр}}$ и $p_{k,\text{гр}} < 0,5$, то предпочтительнее по показателю $P_{\text{ср}}$ активное, а по показателю T – пассивное дублирование;
- если $p_k > p_{k,\text{гр}}$ и $p_{k,\text{гр}} > 0,5$, то предпочтительнее по обоим показателям активное дублирование.

Рассмотрим, как повлияет на выбор системы ее восстанавливаемость. Вероятность безотказной работы восстанавливаемой пассивной системы подчиняется экспоненциальному закону

$$P_{\text{п}}(\lambda_{\text{п}}t) = \exp(-\lambda_{\text{п}}t), \quad (8)$$

где интенсивность отказов системы λ_n обратно пропорциональна ее наработке на отказ T_n

$$\lambda_n = \frac{1}{T_n}. \quad (9)$$

Величина T_n определяется в функции от наработки на отказ T и среднего времени восстановления T_b одного элемента

$$T_n = \frac{T + 3T_b}{2T_b} T. \quad (10)$$

При $T \gg T_b$ формула (10) упрощается

$$T_n \approx \frac{T^2}{2T_b}. \quad (11)$$

Вероятность безотказной работы восстанавливаемой активной системы

$$P_a(\lambda_a t) = \exp(-\lambda_a t) (1 + p_k \lambda_a t). \quad (12)$$

Интенсивность отказов системы λ_a и ее наработка на отказ T_a связаны соотношением

$$\lambda_a = \frac{1}{T_a}, \quad (13)$$

где T_a при идеальных УВК определяется в функции

$$T_a = \frac{T + 2T_b}{T_b} T. \quad (14)$$

При $T \gg T_b$ формула (14) упрощается и принимает вид

$$T_a \approx \frac{T^2}{T_b}. \quad (15)$$

Очевидно, при неидеальных УВК наработка на отказ активной системы будет меньше рассчитанной по формуле (15) и стремится к наработке на отказ пассивной системы при $p_k \rightarrow 0$.

Анализ зависимостей (8), (11), (13), (15) показывает, что условия выбора способа дублирования восстанавливаемых систем аналогичны изложенным выше условиям выбора невосстанавливаемых систем. Окончательный выбор дублированной системы следует производить по минимуму приведенных затрат с учетом как капитальных затрат K , так и эксплуатационных издержек I

$$Z = E_n K + I, \quad (16)$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

Капитальные затраты на создание пассивной системы

$$K_{\text{п}} = 2C_0, \quad (17)$$

где C_0 – стоимость одного основного (резервного) элемента.

Капитальные затраты на создание активной системы

$$K_{\text{а}} = C_0 + C_{\text{УВК}}, \quad (18)$$

где $C_{\text{УВК}}$ – стоимость УВК.

Издержки в рассматриваемой задаче представляют собой годовой производственный ущерб от снижения вероятности безотказной работы или наработки на отказ. В первом случае имеем для пассивной системы

$$I_{\text{п}} = y(1 - P_{\text{п,ср}}), \quad (19)$$

где y – удельный ущерб от снижения средней вероятности безотказной работы системы на одну относительную единицу.

Издержки активной системы

$$I_{\text{а}} = y(1 - P_{\text{а,ср}}). \quad (20)$$

ВЫВОД

Получены условия выбора пассивной или активной системы дублирования по показателям средней вероятности безотказной работы и наработки на отказ, учитывающие ненадежность устройства встроенного контроля и стоимость систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов, Л. П. Основы теории надежности автоматических систем управления / Л. П. Глазунов, В. П. Грабовецкий, О. В. Щербаков. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
2. Анищенко, В. А. Методика выбора невосстанавливаемых резервированных систем управления технологическими процессами / В. А. Анищенко, Л. А. Северин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 2. – С. 5–10.
3. Анищенко, В. А. Выбор невосстанавливаемых резервированных систем контроля и управления энергетическими процессами / В. А. Анищенко, А. Н. Иванова, Е. Л. Мысло // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2012. – № 5. – С. 35–43.

Представлена
кафедрой электроснабжения

Поступила 10.04.2013