

І.С. Дмитрієва, В.К. Лігвінов

АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАДІЙНОСТІ ДУПЛЕКСНИХ СТРУКТУР СИСТЕМ АВАРІЙНОГО ЗАХИСТУ З ПОСТІЙНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

Анотація: Робота присвячена розробці ефективних методів оцінки надійності та відмовостійкості невідтворюваних багатоканальних управляючих систем безпеки і систем аварійного захисту з елементами з трьома несумісними станами і різноманітністю можливих варіантів послідовностей виникнення явних і прихованих відмов з розрахунком ймовірностей перебування цих системи в працездатному стані, у стані помилкового спрацьовування на заданому інтервалі часу.

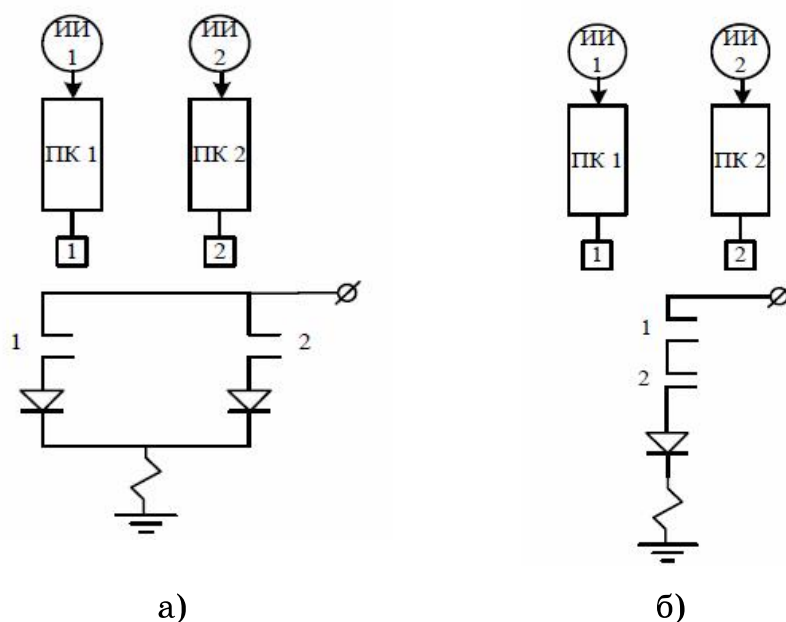
Ключові слова: системи аварійного захисту, надійності, дуплексні структури, постійне резервування

Проблема забезпечення надійності інформаційно-управляючих систем (ІУС) типу АСУ ТП є складною комплексною проблемою особливо для потенційно-небезпечних технічних комплексів, таких як енергоблоки АЕС, ядерні енергетичні системи та ін. Управляючі системи безпеки (УСБ) при виникненні аварійної ситуації на об'єкті управління призводять в дію відповідні захисні, локалізують і забезпечують системи безпеки і координують їх роботу з метою запобігання аварій і катастроф. До УСБ пред'являються надзвичайно високі вимоги по надійності. Аналогічні вимоги пред'являються і до систем аварійного захисту (САЗ) агрегатів і об'єктів, що відносяться до функціональних комплексів технічних засобів забезпечення населеності і боротьби за живучість, зокрема до систем пожежогасіння, аварійного водовідливу, аварійного спливання і іншим.

Цілі і завдання роботи. Розробка математичних моделей і ефективних методів оцінки надійності та відмовостійкості невідтворюваних багатоканальних управляючих систем безпеки і аварійного захисту як систем з елементами з трьома несумісними станами і різноманітністю можливих варіантів послідовностей виникнення явних і прихованих відмов з розрахунком ймовірностей перебування системи

в працездатному стані, у стані помилкового (надмірного) спрацьовування на заданому інтервалі часу.

Розглянемо найпростіші дуплексні структури для отримання аналітичних рішень по оцінці надійностних властивостей САЗ і УСБ, для яких необхідно врахувати як два види відмов каналів (тобто розглядати елементи не бінарні, а елементи з трьома несумісними станами), так і всі можливі послідовності та/або порядок їх слідування в часі (рисунок 1).



ИИ - це джерела інформації; ПК 1, ПК 2-програмовані контролери;
1,2 - обмотки і контакти вихідних управляючих реле.

Рисунок 1 - Дуплексні структури САЗ, які працюють за схемами вибору рішень «1 з 2-х» (а) і «2 з 2-х» (б)

Отримання кінцевих виразів (підкреслимо - в буквеному вигляді) саме для цих «найпростіших» дуплексних структур є важливим при вирішенні задач аналізу УСБ і САЗ.

Перша структура зберігає працездатність при виникненні «прихованої» відмови одного з каналів, друга - при виникненні «явної» відмови одного з каналів.

Кожен окремих канал будемо розглядати як єдиний, який характеризується ймовірністю відмови $q(t)$ на інтервалі $(0, t)$. При цьому будемо розглядати важливий для систем безпеки і аварійного захисту випадок, коли кожен з каналів може мати два види відмов - відмова типу «явна відмова» і типу «прихована відмова», тобто

$$p(t) + q_y(t) + q_c(t) = 1, \quad (1)$$

де $p(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи каналу; $q_y(t)$ - ймовірність «явної» відмови, $q_c(t)$ - ймовірність «прихованої» відмови.

Виникнення «явної» відмови одного з каналів призводить, природно до помилкового або зайвого спрацьовування САЗ; виникнення ж «прихованої» відмови каналу призводить до переходу його в «непостерігаємий» стан непрацездатності та, як наслідок неспрацьовуванні каналу під час вступу заявки на спрацьовування аварійного захисту. Зрозуміло, що як «явну» відмову з «хибним» спрацьовуванням, так і неспрацьовування САЗ призводить до різних наслідків, які для кожного конкретного об'єкта захисту повинні бути уточнені. А отже, визначальний вплив на ступінь небезпеки буде грати співвідношення між потоками «явних» і «прихованих» відмов, для чого в припущенні експоненціального закону напрацювання каналів до відмови з інтенсивністю λ , тобто $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, де $\lambda = \lambda_y + \lambda_c$.

Під відмовою системи будемо розуміти знаходження системи або в стані «помилкового» спрацьовування або в стані перебування в «прихованому» відмову. Крім того, з огляду на істотну відмінність в ступені небезпеки відмов САЗ типу «хибне» спрацьовування і типу неспрацьовування, необхідно дати оцінки ймовірності і «помилкового» спрацьовування, і ймовірності знаходження системи в стані «прихованого» відмови. Для цього необхідно побудувати граф переходів САЗ в просторі технічних станів і в припущенні про експоненціальний закон напрацювання каналів до відмови застосувати теорію марковських випадкових процесів, записавши математичну модель у формі систем диференціальних рівнянь А.Н. Колмогорова. Кінцева мета - отримати бажано аналітичне рішення рівнянь А.Н. Колмогорова в буквенному вигляді.

На рисунку 2 приведені графи переходів САЗ, побудовані з урахуванням проведеного коректного агрегування і укрупнення станів, що можливо при ідентичності каналів.

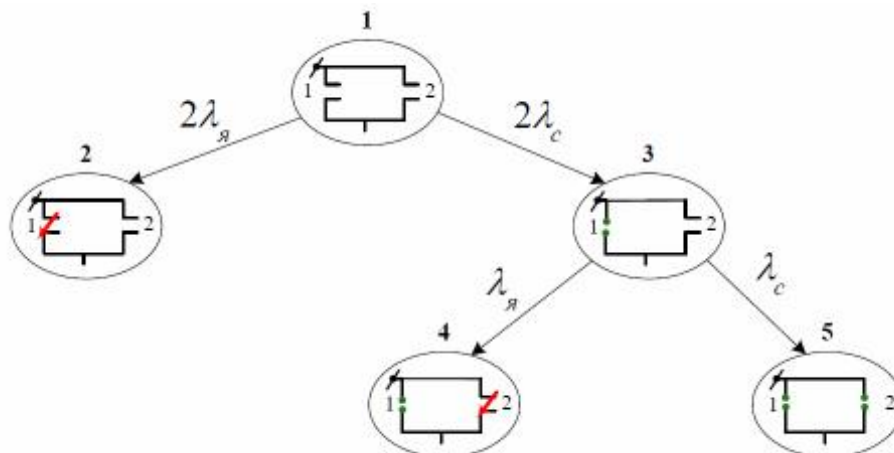


Рисунок 2 - Граф переходів системи «1 з 2-х»
в просторі технічних станів

У вершинах графа нами прийнято зображати спеціальні мнемонічні позначки, що дозволяють надати моделі змістовний опис стану системи і її елементів - канал спрацював «зайве» (стрілка) і канал «приховано» відмовив (дві точки).

Наведемо опис графа для системи «1 з 2-х»:

- Стан «1» - система спочатку працездатна;
- Агрегований стан «2» - «явно» відмовив один з 2-х каналів, що відображено на дузі записом інтенсивності переходу $2\lambda_{я}$ з стану «1» в стан «2»; при цьому відбулося помилкове (зайве) спрацювання системи;

- Агрегований стан «3» - «приховано» відмовив один з 2-х каналів, що відображено записом переходу системи зі стану «1» в стан «3» з інтенсивністю $2\lambda_c$ з. При цьому система залишилася працездатна;

Зауважимо, що запис на дугах з «1» в «2» і з «1» в «3» інтенсивностей $2\lambda_{я}$ і $2\lambda_c$ забезпечує коректність агрегування і укрупнення станів без збитку для оцінок шуканих ймовірності знаходження САЗ в працездатному стані $R(t)$, ймовірності помилкового спрацювання $Q_{н.с.}$ і ймовірності знаходження в стані прихованого відмови $Q_{н.в.}$;

- Стан «4» - помилково спрацював єдиний з працездатних в стані «3». Інтенсивність переходу зі стану «3» в стан помилкового спрацювання $\lambda_{я}$.

- Стан «5» - стан прихованого відмови обох каналів, перехід в яке здійснюється з інтенсивністю з λ_c ; система перейшла в стан прихованого відмови і не зреагує на аварійну ситуацію.

Відзначимо, що $2\lambda_y + 2\lambda_c = 2\lambda$, $\lambda = \lambda_y + \lambda_c$, що ми будемо враховувати при записи диференціальних рівнянь А.Н. Колмогорова.

Виходячи з представленого графа, складемо систему диференціальних рівнянь А.Н. Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -2\lambda P_1; \\ \frac{dP_2}{dt} = 2\lambda_y P_1; \\ \frac{dP_3}{dt} = 2\lambda_c P_1 - \lambda P_3; & P_1(0) = 1; \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_y P_3; & P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = 0. \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_c P_3. \end{cases} \quad (2)$$

Легко отримати рішення системи рівнянь (2) в аналітичному вигляді:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= e^{-2\lambda t}, \\ P_2(t) &= \frac{\lambda_y}{\lambda} (1 - e^{-2\lambda t}), \\ P_3(t) &= 2 \frac{\lambda_c}{\lambda} e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t}), \\ P_4(t) &= 2 \frac{\lambda_y}{\lambda} \frac{\lambda_c}{\lambda} \left[(1 - e^{-\lambda t}) - \frac{1}{2} (1 - e^{-2\lambda t}) \right], \\ P_5(t) &= 2 \left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^2 \left[(1 - e^{-\lambda t}) - \frac{1}{2} (1 - e^{-2\lambda t}) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Прийнявши $a = \frac{\lambda_c}{\lambda}$; $(1-a) = \frac{\lambda_y}{\lambda}$, а також з огляду на те, що ймовірності безвідмовної роботи каналу $p(t) = e^{-\lambda t}$, а ймовірність його відмови $q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, отримаємо рішення системи рівнянь:

$$\begin{aligned}
 P_1(t) &= p^2, \\
 P_2(t) &= (1-a)(1-p^2), \\
 P_3(t) &= 2ap(1-p), \\
 P_4(t) &= 2a(1-a) \left[(1-p) - \frac{1}{2}(1-p^2) \right], \\
 P_5(t) &= 2a^2 \left[(1-p) - \frac{1}{2}(1-p^2) \right].
 \end{aligned} \tag{4}$$

Отримаємо кінцеві вирази для оцінок $R(t)$ - ймовірність знаходження системи в працездатному стані, $Q_{n.c.}$ - ймовірності помилкового спрацьовування САЗ і $Q_{n.в.}$ - ймовірність знаходження САЗ в стані прихованого відмови. І остаточно отримаємо кінцеві вирази:

$$R(t) = P_1(t) + P_3(t) = p^2 + 2ap(1-p); \tag{5}$$

$$Q_{n.в.} = P_5(t) = 2a^2 \left[(1-p) - \frac{1}{2}(1-p^2) \right]; \tag{6}$$

$$Q_{n.c.} = P_2(t) + P_4(t) = (1-a)(1-p^2) + 2a(1-a) \left[(1-p) - \frac{1}{2}(1-p^2) \right]. \tag{7}$$

Отримавши кінцеві вирази для САЗ, що працюють за схемою «1 з 2-х», отримаємо аналогічні кінцеві вирази для САЗ, що працюють за схемою «2 з 2-х» (див. рисунок 1 б). Граф деградації для такої структури зображений на рисунку 3.

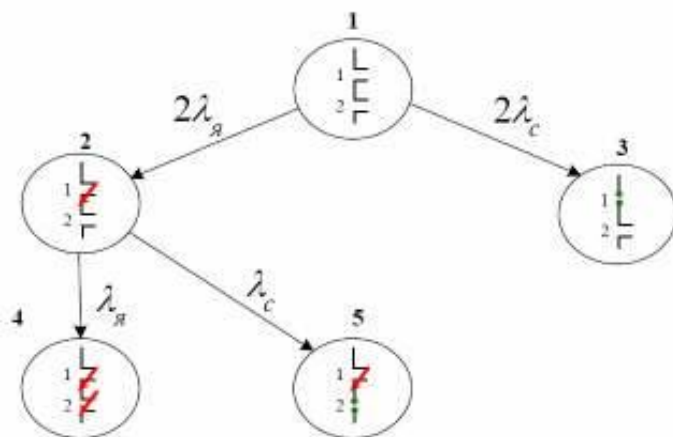


Рисунок 3 - Граф переходів системи «2 з 2-х» в просторі технічних станів

Станами працездатності є стану «1» і «2». Стану 4 і 5 є станами помилкового спрацьовування САЗ, а стан «3» - стан прихованої відмови.

Складаємо рівняння А.Н. Колмогорова. Отримані рішення приведемо до вигляду:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= p^2, \\ P_2(t) &= 2(1-a)p(1-p), \\ P_3(t) &= a(1-p^2), \\ P_4(t) &= (1-a)^2(1-2p+p^2), \\ P_5(t) &= a(1-a)(1-2p+p^2). \end{aligned} \quad (8)$$

Отримаємо кінцеві вирази для оцінок $R(t)$ - ймовірність знаходження системи в працездатному стані, $Q_{n.c.}$ - ймовірності помилкового спрацьовування САЗ і $Q_{n.в.}$ - ймовірність знаходження САЗ в стані прихованого відмови

$$R(t) = P_1(t) + P_2(t) = (2a-1)p^2 + 2(1-a)p; \quad (9)$$

$$Q_{n.в.} = P_3(t) + P_5(t) = a(1-p^2) + a(1-a)(1-p^2); \quad (10)$$

$$Q_{n.c.} = P_4(t) = (1-a)^2(1-p)^2. \quad (11)$$

Отримані аналітичні залежності (5-7) для структури 1 з 2-х і (9-11) для схеми 2 з 2-х будуть в подальших дослідженнях використані для отримання аналогічних залежностей для значно складніших структур систем автоматичного захисту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Белецкий В.В. Теория и практические методы резервирования радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 360 с.
2. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б. Усынин Г.П. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат. 1988 г. – 136 с.