

УДК 681.32

Я.Ю. Королева<sup>1</sup>, М.А. Мирошник<sup>2</sup><sup>1</sup> Национальный технический университет «ХПИ», Харьков<sup>2</sup> Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков

## СИНТЕЗ ПРОВЕРЯЮЩИХ ТЕСТОВ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ОТЛИЧИТЕЛЬНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Проведен анализ методов синтеза проверяющих тестов однородной сети с наблюдаемыми выходами. Получены оценки нижних и верхних границ длины проверяющей последовательности для однородных сетей класса неисправностей  $F_1$ . Разработана методика проектирования  $S$ -тестируемых однородных сетей.

**Ключевые слова:** телекоммуникационные системы и сети, однородная сеть, длина проверяющего теста, циклическая отличительная последовательность.

### Введение

Телекоммуникационные системы и сети являются частью инфраструктуры экономики государства и играют важную роль в жизни общества, определяя степень его развития. Анализируя тенденции в развитии телекоммуникационных сетей и систем, следует отметить их стремительное совершенствование, а, следовательно, совершенствование технологий изготовления радиоэлектронных компонентов и интеграции техники связи и вычислительной техники. Объединение средств телекоммуникаций со средствами обработки и хранения информации создает техническую основу информационного общества, призванного многократно увеличить интеллектуальные возможности человека. Информационные интеллектуальные системы, ядром которых являются сети связи, дают возможность в реальном масштабе времени обмениваться информацией любого объема, любого содержания потребителям, находящимся в любых точках мирового пространства.

С развитием беспроводных телекоммуникационных систем, мобильной аудио-видео, компьютерной техники проблема маршрутизации между отдельными узлами сети с минимальными временными и энергетическими затратами становится очень актуальной, а использование эффективных процедур маршрутизации в телекоммуникационной сети позволит дополнительно повысить характеристики отказоустойчивости и надежности.

Так как по своему происхождению понятия «телекоммуникационные сети» близки к «однородным структурам или сетям» и обозначают их гомогенную аппаратную реализацию, то в дальнейшем в статье будет использоваться аббревиатура «однородная сеть».

Анализ работ в области тестового диагностирования однородных сетей показал, что во всех работах определены необходимые и достаточные условия  $L$  и  $S$  тестируемости сети, получены оценки длины проверяющих экспериментов, предложены методы преобразования ячейки сети, упрощающие процедуру тестового диагностирования [1 – 5].

**Целью данной статьи является** разработка метода синтеза проверяющих тестов однородной сети с наблюдаемыми выходами  $x'_i$ , у которых автоматные модели ячеек имеют отличительные последовательности и являются сильносвязными автоматами.

Получить оценки нижних и верхних границ длины проверяющей последовательности для однородных сетей рассматриваемого класса и разработать методику проектирования  $S$ -тестируемых однородных сетей [6, 7].

### Постановка задачи

В данной статье рассмотрим одномерную однородную сеть с наблюдаемыми выходами  $x'_i$ , которая состоит из  $p$  ячеек комбинационного типа, рис. 1.

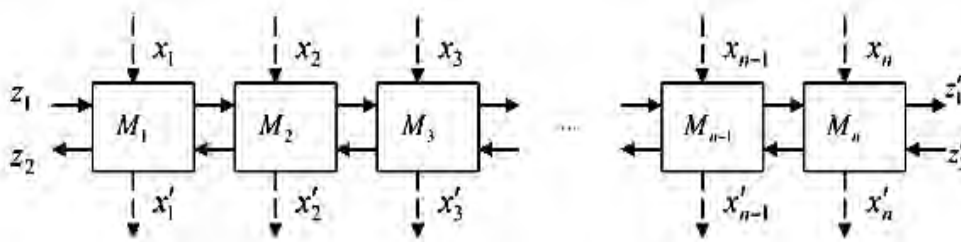


Рис. 1. Структура одномерной сети

Входы однородной сети  $z(1), x(1), x(2), \dots, x(p)$  запитываются логическими переменными, а реакция на их приложение наблюдается непосредственно на выходах  $x'(1), x'(2), \dots, x'(\delta), z'(p)$ .

### Основные обозначения и определения

Пусть  $\alpha_1 \sim x(1)$  обозначает приложение логической переменной (набора логических переменных при наличии нескольких входных полюсов  $x$  в ячейке сети) к входному полюсу (полюсам)  $x(1)$ .

Вектор  $V_j = \{z_1, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p\}$  представляет двоичный входной набор, в котором  $z_1 \sim z(1)$ ,  $\alpha_1 \sim x(1)$ ,  $\alpha_2 \sim x(2)$ , ...,  $\alpha_p \sim x(p)$ .

Вектор  $V_i = \{z_1, (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)^*\}$  представляет двоичный входной набор, в котором  $z_1 \sim z(1)$ ,  $\alpha_1 \sim x(1)$ ,  $\alpha_2 \sim x(2)$  ...  $\alpha_k, \alpha_1 \sim x(k+1)$ . Таким образом, входные полюсы однородной сети записываются циклическими повторяющимися логическими переменными (или наборами переменных)  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ .

Пусть необходимо проверить правильность перехода  $\delta_{ij}(z_i, x_j) = z_a$  в ячейке  $M(1)$  сети, которая имеет отличительную последовательность  $X_0$ . Проверяющий входной набор построим в следующем виде

$$V(\delta_{ij}) = \{z_i, (x_j X_0 T(z_i))^*\}, \quad (1)$$

где  $T(z_i)$  – переводящая последовательность, которая переводит автомат из состояния  $\delta(z_i, x_j X_0) = q_0$  в состояние  $z_i$ .

Действительно, состояние  $z_a$  на выходе ячейки  $M(1)$  различается от множества других состояний  $Z/z_a$  по реакции последующих ячеек, к которым приложена отличительная последовательность  $X_0$ , что обеспечивается наличием в сети наблюдаемых выходов  $x'_i$  и свойствами отличительных последовательностей.

Пусть входной набор  $x_j X_0 T(z_i)$ , прикладываемый к входам  $x$  сети, состоит из « $k$ » входных символов. Так как этот набор циклически повторяется и состояние  $k$ -й ячейки

$$z'_k = \delta(x_j, X_0 T(z_i)) = z_i,$$

то приложение  $V(\delta_{ij})$  к входам сети позволяет проверить правильность переходов  $\delta_{ij}$  в ячейках

$$M(1), M(k+1), M(2k+1), M(3k+1).$$

*Определение 1.* Входной набор  $V(\delta_{ij})$ , определяемый выражением (1), будем называть циклической

отличительной последовательностью одномерной однородной сети с наблюдаемыми выходами  $x'_i$ .

Известно, что в любом сильносвязном автомате с  $n$  состояниями существует множество переводящих последовательностей  $T(z_i), i = \overline{1, n}$ , длина которых не превышает  $(n-1)$  [8].

Учитывая, что минимальная верхняя граница длины отличительной последовательности не превышает  $\frac{n \cdot (n-1)}{2}$ , а минимальная нижняя граница

$\left\lceil \frac{\log_2 n}{\log_2 r} \right\rceil$ , где  $r = |y|$  [8], из (1) верхняя граница длины циклической отличительной последовательности  $|V(\delta_{ij})|$  определяется неравенством:

$$|V(\delta_{ij})| \leq 1 + \frac{n(n-1)}{2} + (n-1) \leq \frac{n}{2}(n+1). \quad (2)$$

Минимальная нижняя граница длины циклической отличительной последовательности  $|V(\delta_{ij})|$  равна

$$|V(\delta_{ij})| \geq \left\lceil \frac{\log_2 n}{\log_2 r} \right\rceil + n, \quad (3)$$

где  $r = |y|$  – число выходных символов ячейки сети.

Как было рассмотрено выше, тест  $V(\delta_{ij})$  проверяет правильность перехода  $\delta_{ij}$  в ячейках сети  $M(1), M(k+1), M(2k+1), \dots$ . Свойство сильносвязности автоматной модели ячейки сети упрощает процедуру нахождения множества тестов, проверяющих этот переход во всех ячейках сети. Эта процедура сводится к циклическому сдвигу входного слова  $x_j X_0 T(z_i)$ . Циклический сдвиг вправо на один символ обеспечивает во второй ячейке переход  $z_i \xrightarrow{x_j} z_a$  и приложение  $X_0$  к последующим ячейкам сети. Следовательно, переход  $\delta_{ij}$  в этом случае проверяется в ячейках  $M(2), M(k+2), M(2k+2), \dots$ . Циклический сдвиг  $(|V(\delta_{ij})| - 1)$  раз теста  $V(\delta_{ij})$  позволяет получить  $|V(\delta_{ij})|$  входных циклических отличительных последовательностей, проверяющих правильность перехода во всех ячейках сети. Тогда верхняя и нижняя граница длины полного теста, проверяющего правильность всех  $(m \times n)$  переходов ячейки сети, с учетом неравенств (2) и (3) равны, соответственно:

$$\ell(T) \leq \frac{1}{2} mn^2 (n+1) \approx mn^3, \quad (4)$$

$$\ell(T) \geq mn \left( \left\lceil \frac{\log_2 n}{\log_2 r} \right\rceil + n \right) \approx mn^2. \quad (5)$$

Из (3) следует, что длина проверяющего теста не зависит от размерности сети (числа  $r$  ячеек сети). Таким образом, сети рассматриваемого класса являются  $S$ -тестируемыми.

### Разработка процедуры синтеза проверяющих тестов для однородной сети с наблюдаемыми выходами

На рис. 2 приведен пример сети из 8 ячеек с наблюдаемыми выходами, описываемый ТПВ (табл. 1).

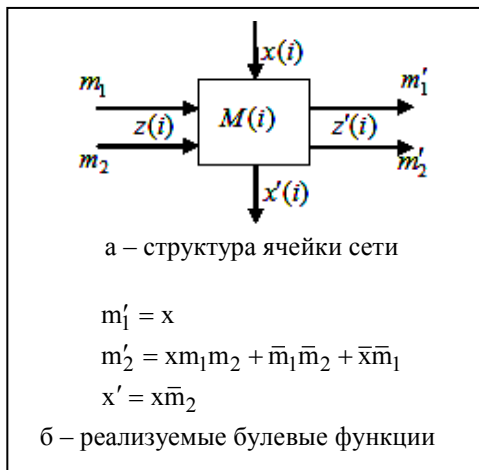


Рис. 2. Ячейка однородной сети

Таблица 1

ТПВ ячейки сети

$m_1m_2$	$Z(t)$	$Z(t+1), x'(t)$	
		$x_1 = 0$	$x_2 = 1$
00	$z_1$	$z_2, 0$	$z_4, 1$
01	$z_2$	$z_2, 0$	$z_3, 0$
10	$z_3$	$z_1, 0$	$z_3, 1$
11	$z_4$	$z_1, 0$	$z_4, 0$

Из ТПВ ячейки (табл. 1) видно, что автоматная модель ячейки имеет отличительную последовательность,  $X_0 = x_2x_2$  и является сильносвязным автоматом. Следовательно, для каждого перехода ТПВ ячейки сети существует циклическая отличительная последовательность. В соответствии с (1) циклическая отличительная последовательность  $V_1(\delta_{10})$  для перехода  $\delta_{10}(z_1, 0) = z_2$  представляется в виде

$$V_1(\delta_{10}) = \{z_1, (0110)^*\},$$

где «11» – отличительная последовательность  $X_0$ ;  
«0» – переводящая последовательность  $T(z_1)$ .

Получаем множество циклических отличительных последовательностей, проверяющих переходы  $\delta_{10}$  во всех ячейках сети в виде

$$\begin{aligned} V_1(\delta_{10}) &= \{z_1, (0110)^*\}, \\ V_2(\delta_{10}) &= \{z_3, (00110)^*\}, \\ V_3(\delta_{10}) &= \{z_3, (00110)^*\}, \\ V_4(\delta_{10}) &= \{z_3, (00110)^*\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Прикладывая тесты (6) к сети из 8 ячеек, получим

$$\begin{aligned} V_1 : z_1 \frac{(0)}{z_2 - z_3 - z_3 - z_1} \frac{(0)}{z_2 - z_3 - z_3 - z_1}; \\ V_2 : z_3 \frac{0}{z_3 - z_1} \frac{(0)}{z_2 - z_3 - z_3 - z_1} \frac{(0)}{z_2 - z_3 - z_3}; \\ V_3 : z_3 \frac{1}{z_3 - z_3 - z_1} \frac{(0)}{z_2 - z_3 - z_3 - z_1} \frac{(0)}{z_2 - z_3}; \\ V_4 : z_2 \frac{1}{z_3 - z_3 - z_3 - z_1} \frac{(0)}{z_2 - z_3 - z_3 - z_1} \frac{(0)}{z_2} z_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Проверяемые переходы в (7) взяты в скобки. Таким образом, переход  $z_1 - z_2$  проверяется во всех ячейках сети четырьмя циклическими отличительными последовательностями независимо от числа ячеек, составляющих сеть.

Аналогично находятся циклические отличительные последовательности для всех переходов ячейки.

На рис. 3 представлено множество циклических тестов, проверяющих все переходы в ячейке, заданной табл. 1, из которого можно определить длину полного проверяющего теста  $\ell(T) = 32$ .

Процесс генерации тестовых последовательностей для однородной сети с наблюдаемыми выходами  $x'_i$ , ячейка которой описывается ТПВ сильносвязного автомата, имеющего отличительную последовательность, можно представить следующим ниже алгоритмом.

$$\begin{aligned} V(\delta_{10}) &= \{z_1, (0110)^*\}, \\ V(\delta_{11}) &= \{z_1, (10)^*\}, \\ V(\delta_{20}) &= \{z_2, (0100)^*\}, \\ V(\delta_{21}) &= \{z_2, (1100)^*\}, \\ V(\delta_{30}) &= \{z_3, (0001)^*\}, \\ V(\delta_{31}) &= \{z_3, (1001)^*\}, \\ V(\delta_{40}) &= \{z_4, (01)^*\}, \\ V(\delta_{41}) &= \{z_4, (10001101)^*\}. \end{aligned}$$

Рис. 3. Множество циклических отличительных последовательностей сети

Алгоритм 1.

1. Построить таблицу переходов-выходов автомата Мили по заданной логической схеме ячейки сети. Пусть ТПВ имеет  $n$  строк и  $m$  столбцов.

2. Построить отличительное дерево-преемников автомата и найти отличительную последовательность  $X_0$ .

3. Для каждого перехода ТПВ  $\delta_{ij}(z_i, x_j) = z_a$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , найти множество конечных состояний  $\delta(z_a, x_0) = z_k$ .

4. Найти множество переводящих последовательностей  $T(z_k, z_i)$  по ТПВ для каждого перехода, где множество состояний  $\{z_k\}$  определено на шаге 3.

5. Построить множество циклических отличительных последовательностей  $V(\delta_{ij})$  для каждого перехода автоматной диаграммы, используя  $X_0$  и  $T(z_k, z_i)$ . Пусть длина циклической отличительной последовательности  $|V(\delta_{ij})| = t$ .

6. Для каждого проверяющего теста  $V(\delta_{ij})$  заполнить  $(t-1)$  циклических сдвигов, которые определяют циклические отличительные последовательности, проверяющих правильность всех  $(m \times n)$  переходов ТПВ в каждой ячейке сети.

7. Конец алгоритма.

Рассмотрим схему многорядного параллельного сумматора с последовательным переносом. Такая схема представляет однородную сеть с наблюдаемыми выходами  $x'_i$ , у которой каждая ячейка выполняет функцию полного одноразрядного сумматора. В табл. 2 представлена ТПВ ячейки полного одноразрядного сумматора, где  $x$  – входы суммируемых переменных,  $x'_i$  – выход суммы,  $z$  – функция переноса.

Из табл. 2 легко определить, что автомат является сильносвязным и каждый входной символ – отличительная последовательность.

В соответствии с процедурой алгоритма 1 можно найти для каждого перехода циклические отличительные последовательности, представленные на рис. 4, а, по которым легко построить 8 тестов, проверяющих схему сумматора любой размерности (рис. 4, б).

Таблица 2

ТПВ ячейки полного одноразрядного сумматора

Z(t)	x	Z(t+1), x'(t)			
		x <sub>1</sub> = 00	x <sub>2</sub> = 01	x <sub>3</sub> = 10	x <sub>4</sub> = 11
z <sub>1</sub>	0	0, 0	0, 1	0, 1	1, 0
z <sub>2</sub>	1	0, 1	1, 0	1, 0	1, 1

В отличие от предложенной выше процедуры в [2] для проверки однородной сети многорядного сумматора построен тест, представляющий собой эйлеров цикл графа автомата, заданного табл. 2.

Циклический сдвиг тестовой последовательности

$$z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} \dots \quad (8)$$

позволяет также получить 8 тестов, проверяющих все переходы в каждой ячейке сети [2]. Однако, как показано в [9], в случае кратной неисправности сети, которая иллюстрирована ТПВ двух первых неисправных ячеек сети M(1) и M(2) (таблица 3 и 4) тест, генерируемый по (8), не обнаруживает эту неисправность. Таким образом, приведенный пример опровергает утверждение Диаза [2] о том, что предложенные им тестовые последовательности обнаруживают класс неисправностей  $F_k$ .

С другой стороны, проверяющий тест, построенный по алгоритму 1 (рис. 4), обнаруживает кратную неисправность, задаваемую таблицами 3 и 4. В частности, циклический тест  $V(\delta_{12})$  для исправной и неисправной сети вызывает различную реакцию на наблюдаемых выходах  $x'_i$  ячеек M(2), M(3), ...

$$\begin{aligned} V(\delta_{1,1}) &= \{z_1, (x_1)^*\}, & V(\delta_{2,1}) &= \{z_2, (x_1 x_4)^*\}, \\ V(\delta_{1,2}) &= \{z_1, (x_2)^*\}, & V(\delta_{2,2}) &= \{z_2, (x_2)^*\}, \\ V(\delta_{1,3}) &= \{z_1, (x_3)^*\}, & V(\delta_{2,3}) &= \{z_2, (x_3)^*\}, \\ V(\delta_{1,4}) &= \{z_1, (x_4 x_1)^*\}; & V(\delta_{2,4}) &= \{z_2, (x_4)^*\}. \end{aligned}$$

а – множество циклических отличительных последовательностей

$$V_1 : z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} z_1 \dots$$

$$V_2 : z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{01} z_1 \dots$$

$$V_3 : z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{10} z_1 \dots$$

$$V_4 : z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 \dots$$

$$V_5 : z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{11} z_2 \dots$$

$$V_6 : z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{01} z_2 \dots$$

$$V_7 : z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{10} z_2 \dots$$

$$V_8 : z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{11} z_2 \dots$$

б – множество циклических тестов

Рис. 4. Полный проверяющий тест однородной сети многорядного сумматора

Таблиця 3

ТПВ ячейки M(1)

Z(t)	x	Z(t+1), x'(t)			
		x <sub>1</sub> = 00	x <sub>2</sub> = 01	x <sub>3</sub> = 10	x <sub>4</sub> = 11
z <sub>1</sub>	0	0,0	1,1	1,1	1,0
z <sub>2</sub>	1	0,1	0,0	0,0	1,1

Таблиця 4

ТПВ ячейки M(2)

Z(t)	x	Z(t+1), x'(t)			
		x <sub>1</sub> = 00	x <sub>2</sub> = 01	x <sub>3</sub> = 10	x <sub>4</sub> = 11
z <sub>1</sub>	0	0,0	0,1	1,0	1,1
z <sub>2</sub>	1	0,1	1,0	0,1	1,0

### Выводы

В данной статье предложен алгоритм синтеза проверяющих тестов для однородной сети с наблюдаемыми выходами  $x'_i$ . В предложенном алгоритме автоматная модель ячейки имеет отличительную последовательность и является сильносвязным автоматом. Что позволяет получить множество тестовых наборов, которые обнаруживают любую неисправность, приводящую к искажению автоматной диаграммы ячейки, при ограничении, что в момент проверки допускается неисправной только одна ячейка сети (класс неисправностей  $F_1$ ).

### Список литературы

1. Friedman A.D. Fault detection in digital circuits / A.D. Friedman, P.R. Menon. – New Jersey: Prentice Hall, 1971. – 220 p.

2. Dias F.J. Truth-table verification of an iterative logic array / F.J. Dias // IEEE Trans. Computers. – 1976. – № 6. – P. 605 – 613.

3. Синтез проверяющих тестов для сетей клеточных автоматов с наблюдаемыми выходами / Я.Ю. Королева, М.А. Бережная, О.Н. Замирец [та ін.] // Технология приборостроения. – 2008. – № 2. – С. 20 – 25.

4. Тестовое диагностирование одномерных однородных структур / Л.В. Дербунович, М.А. Бережная, Я.Ю. Королева [та ін.] // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Х.: НТУ „ХПІ”, 2008. – № 31. – С. 49 – 57.

5. Синтез проверяющих тестов для однородных структур на основе циклических отличительных последовательностей / Л.В. Дербунович, М.А. Бережная, Я.Ю. Королева [та ін.] // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2008. – № 4(72). – С. 29 – 33.

6. Тестовое диагностирование телекоммуникационных систем на базе одномерных однородных клеточных сетей / Я.Ю. Королева, М.А. Мирошник Г.И. Загарий // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 2. – С. 68 – 72.

7. Королева Я. Однородные вычислительные сети с реконфигурируемой структурой / Я. Королева, М. Бережная // Технология приборостроения. – 2008. – № 1. – С. 44 – 48.

8. Гилл Н. Введение в теорию конечных автоматов / Гилл Н. – М.: Наука, 1966. – 272 с.

9. Королева Я.Ю. Синтез проверяющих тестов для однородных схем / Я.Ю. Королева, М.А. Бережная, Г.Г. Четвериков // Бионика интеллекта. – 2009. – № 2(71). – С. 123 – 127.

Поступила в редколлегию 30.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.И. Загарий, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков.

### СИНТЕЗ ПЕРЕВІРЮЧИХ ТЕСТІВ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ЦИКЛІЧНИХ ВІДМІТНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ

Я.Ю. Королева, М.А. Мирошник

Проведено аналіз методів синтезу перевіряючих тестів однорідної мережі з виходами, що спостерігаються. Отримано оцінки нижньої та верхньої межі довжини перевіряючої послідовності для однорідних мереж класу несправності  $F_1$ . Розроблена методика проектування S-тестованих однорідних мереж.

**Ключові слова:** телекомунікаційні системи та мережі, однорідна мережа, довжина перевіряючого тесту, циклічна відмінна послідовність.

### SYNTHESIS OF TEST GENERATION FOR TELECOMMUNICATIONS NETWORK BASED ON CYCLIC DISTINGUISHING SEQUENCES

J.Y. Klimenko, M.A. Muroshnuk

The analysis methods for the synthesis validation tests of a homogeneous network with the observable outputs is presented. Estimates are obtained for the lower and upper bounds for the length of the relying sequence of homogeneous networks class of faults  $F_1$ . A method for designing S-homogeneous test networks is proposed.

**Keyword:** telecommunication systems and networks, a homogeneous network, the length of checking test, cyclic distinctive sequence.