

УДК 621.3.011.712

doi: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.024

А.В. Скляр  
**АНАЛИЗ ПОДСТРОЙКИ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ  
ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СШИВАНИЯ ЧАСТЕЙ  
ДЕКОМПОЗИРОВАННОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДОПОЛНЕНИЯ ШУРА**  
*Южный федеральный университет, Таганрог, Россия*

*Статья продолжает цикл работ автора по теме полунатурного моделирования более известного за рубежом как ННМ-моделирование. В статье предложен алгоритм декомпозиции любой радиотехнической системы и последующего сшивания её частей при подстройке всего лишь одного из двух стабилизирующих параметров схемы сшивания. Кроме того, проанализирована возможность использования схемы сшивания в качестве согласующего устройства между фрагментами системы с точки зрения устойчивости системы. Всё это позволяет существенно сократить объём отладочных работ, выполняемых при полунатурном моделировании радиотехнических систем, как в области исследования элементарных систем, так и при отработке вариантов создания сложных мультисистем. В качестве доказательства правильности предложенного метода произведён аналитический расчёт, в общем виде показывающий возможность подстройки только одного стабилизирующего параметра в схеме сшивания декомпозированной системы, при этом сходимость параметров декомпозированной и исходной систем может быть достигнута за несколько итераций, а в некоторых случаях такой сходимости можно добиться и за одну итерацию. В заключении статьи выполнен расчёт с использованием численного примера для практического подтверждения предлагаемого метода. Для наглядности и правильного понимания описываемых действий приведены иллюстрации, как производимых операций, так и результатов вычислений.*

**Ключевые слова:** стабилизирующий параметр, декомпозиция системы, схема сшивания, полунатурное моделирование, радиотехническая система, правило Крамера, дополнение Шура.

**Введение.** В последнее время в радиотехнике получило практическое использование полунатурное моделирование, которое сначала в зарубежной, а затем и в отечественной научной литературе обрело название – ННМ-моделирование [1 – 8]. Полунатурное моделирование предполагает, что любая произвольно взятая радиотехническая система, к примеру – электрическая цепь, имеющая схему замещения, представленную на Рисунке 1, может быть декомпозирована на две отдельные части – экспериментальный макет аппаратной части и программную модель численной части.

Этот метод декомпозиции [9] позволяет выполнить проверку создаваемой системы на предмет работоспособности ещё в процессе её проектирования для выявления её несоответствий заявленным требованиям и доведения до требуемых норм, причём с использованием ресурсов самого метода.

**Постановка задачи и анализ.** Любая произвольно взятая в качестве исходной радиотехническая система может быть представлена в виде двух частей *A* и *B*, имеющих выходную  $Y_1$  и входную  $Y_2$  эквивалентные проводимости, как показано на Рисунке 1.

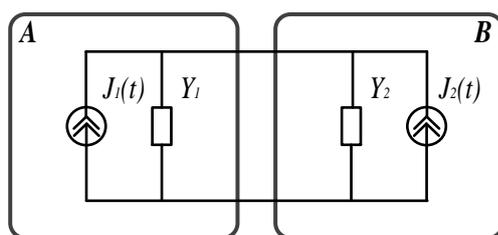


Рисунок 1. – Части *A* и *B* исходной системы

Эта же система на Рисунке 2 представлена в декомпозированном виде.

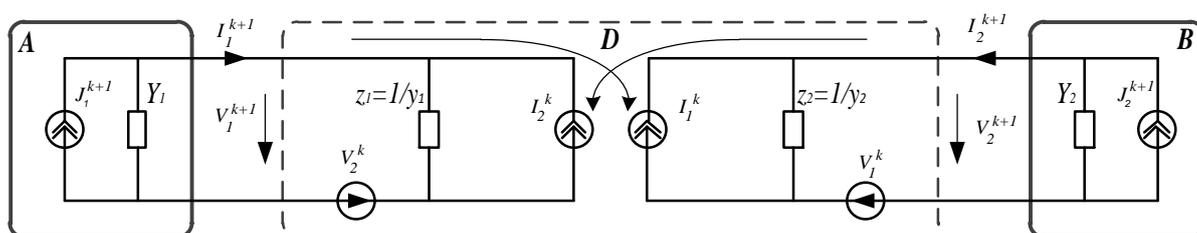


Рисунок 2. – Система, разбитая на две части с обобщённой схемой сшивания

На Рисунке 2 схема сшивания состоит из двух частей – двух половинок, в каждой из которых имеется идеализированный источник тока ( $J_1$  или  $J_2$ ) и напряжения ( $V_1$  или  $V_2$ ), а также стабилизирующий элемент ( $z_1=1/y_1$  или  $z_2=1/y_2$ ). Параметр  $k+1$  в обозначениях токов и напряжений характеризует значения токов и напряжений в текущий момент времени (или на текущем шаге интегрирования), а параметр  $k$  характеризует значения токов и напряжений в предыдущий момент времени (или на предыдущем шаге интегрирования). Из Рисунка 2 видно, что схема

сшивания, помимо всего прочего, вносит определённую задержку во взаимодействие частей **A** и **B**

В схеме сшивания напряжения и токи связаны следующим образом:

$$\begin{pmatrix} Y_1 + \frac{1}{z_1} & 0 \\ 0 & Y_2 + \frac{1}{z_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^{k+1} \\ v_2^{k+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & Y_2 - \frac{1}{z_1} \\ Y_1 - \frac{1}{z_2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^k \\ v_2^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1^{k+1} + J_2^k \\ J_2^{k+1} + J_1^k \end{pmatrix} \quad (1)$$

или

$$\begin{pmatrix} v_1^{k+1} \\ v_2^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1 - Y_2}{z_1} \\ \frac{1 - Y_1}{z_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_1^k \\ v_2^k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{J_1^{k+1}}{z_1 + Y_1} + \frac{J_2^k}{z_1 + Y_1} \\ \frac{J_2^{k+1}}{z_2 + Y_2} + \frac{J_1^k}{z_2 + Y_2} \end{pmatrix}$$

Целями данной статьи являются:

1) Доказать, используя критерий устойчивости по Ляпунову, что в обобщённой схеме сшивания отсутствуют противоречия, т.е. её внедрение в систему, изображённую на Рисунке 2, не приведёт к изменению самой системы.

2) Доказать, что сходимость параметров разделённой на части системы к параметрам исходной системы при подстройке двух стабилизирующих параметров в некоторых случаях может быть достигнута за одну итерацию.

3) Доказать, что сходимости параметров разделённой на части системы к параметрам исходной системы можно добиться и в случае, когда правильно настроен только один из двух стабилизирующих параметров.

**Решение проблемы.** Исходя из выражения (1), матрица перехода  $W$  будет иметь следующий вид:

$$W = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1 - Y_2}{z_1} \\ \frac{1 - Y_1}{z_2} & 0 \\ \frac{1}{z_1} + Y_1 & \\ & \frac{1}{z_2} + Y_2 \end{bmatrix}$$

Матрица перехода  $W$  имеет собственные значения:

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{\left(Y_2 - \frac{1}{z_1}\right)\left(Y_1 - \frac{1}{z_2}\right)}{\left(Y_1 + \frac{1}{z_1}\right)\left(Y_2 + \frac{1}{z_2}\right)}}, \quad (2)$$

которые, как видно из формулы (2), представлены двумя реальными или мнимыми числами. Для выполнения критерия устойчивости (по Ляпунову) необходимо выполнение следующего условия [6]:

$$|\lambda_{1,2}| < 1. \quad (3)$$

При выполнении одного или сразу обоих из условий:

$$z_1 = \frac{1}{y_1} = \frac{1}{Y_2};$$

$$z_2 = \frac{1}{y_2} = \frac{1}{Y_1},$$

значения собственных чисел матрицы  $W$  равны нулю и метод из итерационного превращается в прямой.

Если условие (3) выполняется, то после выполнения нескольких итераций решение сходится и при этом система (1) принимает следующие виды:

$$\begin{pmatrix} Y_1 + \frac{1}{z_1} & Y_2 - \frac{1}{z_1} \\ Y_1 - \frac{1}{z_2} & Y_2 + \frac{1}{z_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 + J_2 \\ J_2 + J_1 \end{pmatrix};$$

$$v_1 = v_2 = \frac{J_1 + J_2}{Y_1 + Y_2},$$

совпадающие с решением исходной системы. Следовательно, непротиворечивость схемы шивания при её включении между частями А и В системы доказана.

В результате схема шивания имеет вид четырёхполюсника, обеспечивающего согласование и информационный обмен между программной и аппаратной частями декомпозированной системы по методу Якоби, согласно которому решение уравнений электрического равновесия выполняются параллельно друг другу для обеих частей. Затем выполняется обмен информацией между частями системы и этот процесс многократно повторяется. Временной интервал между обменами информацией принято называть шагом интегрирования. В каждый шаг интегрирования входит от одной до нескольких итераций, при этом на каждой из них выполняется решение уравнений электрического равновесия декомпозированной системы.

Для рассмотрения разбитой на части системы необходимо перейти от дискретной формы схемы замещения обобщенной схемы шивания к операторной форме (см. Рисунок 3) и использовать методы анализа радиотехнических цепей [10,11].

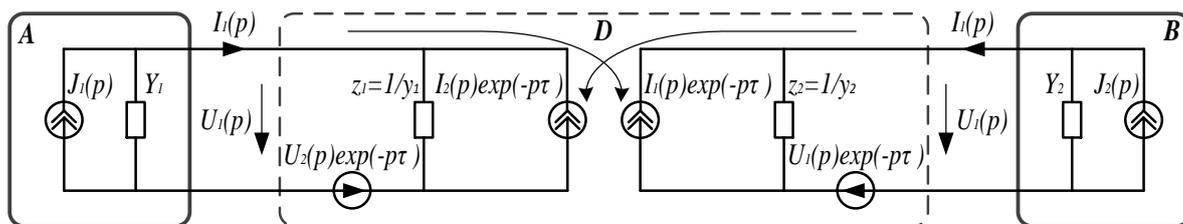


Рисунок 3. – Система, разбитая на две части с обобщённой схемой шивания в операторном виде

Четырёхполюсник **D** схемы шивания будет иметь следующие  $Y$ -параметры:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \exp(-2p\tau)}{1 - \exp(-2p\tau)} & \frac{\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right) \exp(-p\tau)}{1 - \exp(-2p\tau)} \\ \frac{\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right) \exp(-p\tau)}{1 - \exp(-2p\tau)} & \frac{\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1} 2\exp(-2p\tau)}{1 - \exp(-2p\tau)} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для сшивающего четырёхполюсника с нагрузками  $Y_2$  и  $Y_1$  на основе  $Y$ -параметров можно определить эквивалентную входную –  $Y_{11}$  и выходную –  $Y_{22}$  проводимости, коэффициенты передачи по току  $G_{12}$ ,  $G_{21}$  и коэффициенты передачи по напряжению  $K_{12}$ ,  $K_{21}$  следующим образом:

$$Y_{11} = -\frac{-\frac{1}{z_1}\left(\frac{1}{z_2} + Y_2\right) + \left(\frac{1}{z_1} - Y_2\right)\frac{1}{z_2}\exp(-2p\tau)}{Y_2 + \frac{1}{z_2} + \left(\frac{1}{z_1} - Y_2\right)\exp(-2p\tau)},$$

$$Y_{22} = -\frac{-\frac{1}{z_2}\left(\frac{1}{z_1} + Y_1\right) + \left(\frac{1}{z_2} - Y_1\right)\frac{1}{z_2}\exp(-2p\tau)}{Y_1 + \frac{1}{z_1} + \left(\frac{1}{z_2} - Y_1\right)\exp(-2p\tau)},$$

$$G_{12} = \frac{Y_2\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right)\exp(-p\tau)}{-\frac{1}{z_1}\left(\frac{1}{z_2} + Y_2\right) + \left(\frac{1}{z_1} - Y_2\right)\frac{1}{z_2}\exp(-2p\tau)},$$

$$G_{21} = \frac{Y_1\left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)\exp(-p\tau)}{-\frac{1}{z_2}\left(\frac{1}{z_1} + Y_1\right) + \left(\frac{1}{z_2} - Y_1\right)\frac{1}{z_2}\exp(-2p\tau)},$$

$$K_{12} = \frac{\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right)\exp(-p\tau)}{Y_2 + \frac{1}{z_2} + \left(\frac{1}{z_1} - Y_2\right)\exp(-2p\tau)},$$

$$K_{21} = \frac{\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right)\exp(-p\tau)}{Y_1 + \frac{1}{z_1} + \left(\frac{1}{z_2} - Y_1\right)\exp(-2p\tau)}.$$

Если подставить значения  $1/z_1 = Y_2$  в выражения  $K_{12}(p)$ ,  $G_{12}(p)$ ,  $Y_{11}(p)$ , а значения  $1/z_2 = Y_1$  в выражения  $K_{21}(p)$ ,  $G_{21}(p)$ ,  $Y_{22}(p)$ , то будет получено следующее:

$$K_{12}(p) = \frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \exp(-p\tau), \quad G_{12}(p) = \frac{I_2(p)}{I_1(p)} = -\exp(-p\tau), \quad Y_{11}(p) = Y_2,$$

$$K_{21}(p) = \frac{V_1(p)}{V_2(p)} = \exp(-p\tau), \quad G_{21}(p) = \frac{I_1(p)}{I_2(p)} = -\exp(-p\tau), \quad Y_{22}(p) = Y_1.$$

Исследование представленных результатов позволяет сделать следующие выводы. Если параметр  $z_1$  будет выбран равным  $1/Y_2$ , то происходит совпадение значений для токов и для напряжений на входе и выходе четырёхполюсника при задержке на один шаг. Эквивалентная входная проводимость схемы сшивания при этом будет равна проводимости нагрузки  $Y_2$ . Подобным образом, если параметр  $z_2$  будет выбран равным  $1/Y_1$ , то с учётом задержки на один шаг совпадут напряжения и токи на входе и выходе четырёхполюсника, а выходная проводимость схемы сшивания будет равна  $Y_1$ . При этом, в режиме  $z_1=1/Y_2$  и  $z_2=1/Y_1$  четырёхполюсник  $D$  будет представлять собой идеальную линию задержки.

Если для частей системы  $A$  и  $B$  матрицы параметров определены и составлены по методу узловых напряжений, то появляется возможность вычислить аналитически значения проводимостей системы  $Y_1$  и  $Y_2$ .

Например, пусть имеются матрицы второго порядка, в общем виде описывающие поведение частей  $A$  и  $B$  системы:

$$\begin{bmatrix} Y_{A11} & Y_{A12} \\ Y_{A21} & Y_{A22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad \begin{bmatrix} Y_{B11} & Y_{B12} \\ Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_3 \\ J_4 \end{bmatrix}.$$

Для этого случая порядок матрицы значения не имеет. Здесь главное – это то, что матрицы «пересекаются» одним коэффициентом [10,11,12].

Поведение исходной системы (радиотехнической цепи), не разбитой на части, описывается системой уравнений, составленной по методу узловых напряжений:

$$\begin{bmatrix} Y_{A11} & Y_{A12} & 0 \\ Y_{A21} & Y_{A22} + Y_{B11} & Y_{B12} \\ 0 & Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 + J_3 \\ J_4 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $U_2 \equiv U_3$ .

Тогда разбитую на части  $A$  и  $B$  систему можно описать системой уравнений следующего вида:

$$\begin{bmatrix} Y_{A11} & Y_{A12} & 0 & 0 \\ Y_{A21} & Y_{A22} + \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \exp(-2p\tau) & -\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right) \exp(-p\tau) & 0 \\ 0 & -\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right) \exp(-p\tau) & Y_{B11} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1} \exp(-2p\tau) & Y_{B12} \\ 0 & 0 & Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Когда неизвестны коэффициенты матриц  $Y_A$  и  $Y_B$ , то в систему следует добавить (см. Рисунок 4) два источника напряжения  $E=0$  [12].

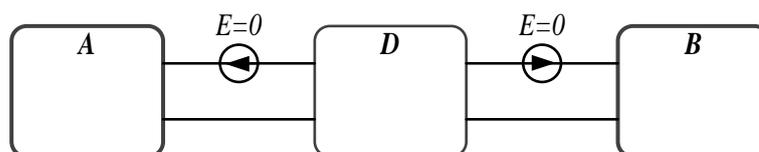


Рисунок 4. – Добавление в систему нулевых источников напряжения

Тогда можно будет выразить токи  $I_a$  и  $I_b$ , вытекающие из частей  $A$  и  $B$  в четырёхполюсник  $D$ . Источники напряжения, имеющие нулевые значения, не поменяют общего решения и система примет вид:

$$\begin{bmatrix} Y_{A11} & Y_{A12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{A21} & Y_{A22} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} z^{-2} & -\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right) z^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{1-z^{-2}} & \frac{1}{1-z^{-2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right) z^{-1} & \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1} z^{-2} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & Y_{B11} & Y_{B12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ I_a \\ U_4 \\ U_5 \\ I_b \\ U_7 \\ U_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix}$$

Затем следует строки матрицы 4 и 5 умножить на значение  $(1-z^{-2})$  и перейти к разностным уравнениям:

$$\begin{bmatrix} Y_{A11} & Y_{A12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{A21} & Y_{A22} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(1-z^{-2}) & \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} z^{-2} & -(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1})z^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1})z^{-1} & \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1} z^{-2} & -(1-z^{-2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & Y_{B11} & Y_{B12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ Ia \\ U_4 \\ U_5 \\ Ib \\ U_7 \\ U_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y_{A11}U_1 + Y_{A12}U_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{A21}U_1 + Y_{A22}U_2 & +Ia & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & U_2 & 0 & -U_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Ia + Ia^{-2} & +\frac{1}{z_1}U_4 + \frac{1}{z_2}U_4^{-2} & -(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1})U_5^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1})U_4^{-1} & +\frac{1}{z_2}U_5 + \frac{1}{z_1}U_5^{-2} & -Ib + Ib^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -U_5 & 0 & +U_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Ib & +Y_{B11}U_7 + Y_{B12}U_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +Y_{B21}U_7 + Y_{B22}U_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix}$$

Результатом выполненного математического преобразования будет следующая система:

$$\begin{bmatrix} Y_{A11} & Y_{A12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{A21} & Y_{A22} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \frac{1}{z_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{z_2} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & Y_{B11} & Y_{B12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ Ia \\ U_4 \\ U_5 \\ Ib \\ U_7 \\ U_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ 0 \\ -\frac{1}{z_2}U_4^{-2} + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)U_5^{-1} - I_a^{-2} \\ -\frac{1}{z_1}U_5^{-2} + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)U_4^{-1} - I_b^{-2} \\ 0 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Когда известны коэффициенты матриц  $A$  и  $B$ , систему (6) можно выразить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} Y_{A11} & Y_{A12} & 0 & 0 \\ Y_{A21} & Y_{A22} + \frac{1}{z_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{B11} + \frac{1}{z_2} & Y_{B12} \\ 0 & 0 & Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 - J_2^{-2} + (Y_{A21}U_1^{-2} + Y_{A22}U_2^{-2}) + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)U_3^{-1} - \frac{1}{z_2}U_2^{-2} \\ (Y_{B11}U_3^{-2} + Y_{B12}U_4^{-2}) + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)U_2^{-1} - \frac{1}{z_1}U_3^{-2} \\ J_3 \end{bmatrix}$$

Значения системы  $z_1$  и  $z_2$  можно определить исходя из следующих выражений:

$$\begin{aligned} z_1 &= 1/Y_2 = Y_{B22} / (Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B12}Y_{B21}) = Y_{B22} / \det(Y_B) \\ z_2 &= 1/Y_1 = Y_{A11} / (Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A12}Y_{A21}) = Y_{A11} / \det(Y_A) \end{aligned} \quad (8)$$

Такие математические преобразования называются дополнением Шура. Решение упрощается, если знаменатель условия равен нулю. В этом случае следует выбирать значения стабилизирующих параметров:

$$\begin{aligned} z_1 &= 1/Y_{B11}; \\ z_2 &= 1/Y_{A33}. \end{aligned}$$

Правильный выбор значений стабилизирующих параметров  $z_1$  и  $z_2$  разбитой на части системы приводит к решению прямым методом, а не итерационным. При этом в качестве доказательства необходимо для систем (5, 6) использовать выражение (8) и правило Крамера. Тогда решение исходной системы (5) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{(Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B12}Y_{B21} + Y_{B22}Y_{A22})J_1 - Y_{B22}Y_{A12}J_2 + Y_{A12}Y_{B12}J_3}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}} \\ U_2 &= \frac{-Y_{B22}Y_{A21}J_1 + Y_{B22}Y_{A11}J_2 - Y_{A11}Y_{B12}J_3}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}, \\ U_3 &= \frac{Y_{B21}Y_{A21}J_1 - Y_{B21}Y_{A11}J_2 + (Y_{A11}Y_{A22} + Y_{A11}Y_{B11} - Y_{A21}Y_{A12})J_3}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}. \end{aligned} \quad (9)$$

С помощью правила Крамера следует найти решение разбитой на части системы (6) при условии, что стабилизирующие параметры  $z_1$  и  $z_2$  определены в соответствии с выражениями (8), а затем и сравнить результаты решений систем (5) и (6):

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{(Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B12}Y_{B21} + Y_{B22}Y_{A22})J_1 - Y_{B22}Y_{A12}J_2 + Y_{A12}Y_{B12}J_3 e^{-p\tau}}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}, \\ U_2 &= \frac{-Y_{B22}Y_{A21}J_1 + Y_{B22}Y_{A11}J_2 - Y_{A11}Y_{B12}J_3 e^{-p\tau}}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$U_3 = \frac{-Y_{B22}Y_{A21}J_1e^{-p\tau} + Y_{B22}Y_{A11}J_2e^{-p\tau} - Y_{A11}Y_{B12}J_3}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B21}Y_{B12} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}},$$

$$U_4 = \frac{Y_{B21}Y_{A21}J_1e^{-p\tau} - Y_{B21}Y_{A11}J_2e^{-p\tau} + (Y_{A11}Y_{A22} + Y_{A11}Y_{B11} - Y_{A21}Y_{A12})J_3}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B21}Y_{B12} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}$$

Полученные результаты решения систем совпали с точностью до множителя  $e^{-p\tau}$ , указывающего на необходимость дважды решить систему (5) при одних и тех же значениях вектора свободных членов (т.е.  $J_1(t)=J_1(t-\tau)$ ,  $J_2(t)=J_2(t-\tau)$ ,  $J_3(t)=J_3(t-\tau)$ ). В таком случае решения систем (5) и (6) будут полностью совпадать. При выполнении этого же условия из выражения (10) видно, что  $U_2=U_3$ . Если же принять значение источника тока  $J_3 = 0$ , а значением  $U_4$  пренебречь, то значения  $U_1$  и  $U_2$  определяются за одну итерацию.

Повторно применив правило Крамера таким же образом выполняется решение разбитой на части системы (6) при условии настройки только одного стабилизирующего параметра, к примеру –  $z_1$ . Тогда  $z_1$  вычисляется с использованием выражения (8), а  $z_2$  может иметь любое значение. При этом следует сравнить результаты решений систем (5) и (6). Для системы (6) решение будет следующим:

$$U_1 = \frac{(Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B12}Y_{B21} + Y_{B22}Y_{A22})J_1 - Y_{B22}Y_{A12}J_2 + Y_{A12}Y_{B12}J_3e^{-p\tau}}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}},$$

$$U_2 = \frac{-Y_{B22}Y_{A21}J_1 + Y_{B22}Y_{A11}J_2 - Y_{A11}Y_{B12}J_3e^{-p\tau}}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}},$$

$$U_3 = \frac{\left( (Y_{A11}Y_{B12}Y_{A22}Y_{B22} + Y_{A21}Y_{A12}Y_{B12}Y_{B22})(1 - e^{-2p\tau}) - Y_{A11}Y_{B12} \left( Y_{B22}Y_{B11} - Y_{B12}Y_{B21} + \frac{Y_{B22}e^{-2p\tau}}{z_2} \right) \right) J_3}{(Y_{B22}Y_{B11} - Y_{B12}Y_{B21} + \frac{Y_{B22}}{z_2})(Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B21}Y_{B12} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12})} +$$

$$+ \frac{-Y_{B22}Y_{A21}J_1e^{-p\tau} + Y_{B22}Y_{A11}J_2e^{-p\tau}}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}} \quad .1)$$

$$\begin{aligned}
 U_4 = & \frac{\left( \left( Y_{B11}Y_{B22} + \frac{Y_{B22}}{z_2} \right) (Y_{A11}Y_{B11} + Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A21}Y_{A12}) \right) J_3}{(Y_{B22}Y_{B11} - Y_{B12}Y_{B21} + \frac{Y_{B22}}{z_2})(Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12})} + \\
 & + \frac{(-Y_{B12}Y_{B21}(Y_{A11}Y_{B11} + Y_{A11}Y_{A22}e^{-2p\tau} - Y_{A21}Y_{A12}e^{-2p\tau}) + \frac{Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21}(e^{-2p\tau} - 1))J_3}{z_2}}{(Y_{B22}Y_{B11} - Y_{B12}Y_{B21} + \frac{Y_{B22}}{z_2})(Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12})} + \\
 & + \frac{Y_{A21}Y_{B21}J_1e^{-p\tau} - Y_{A11}Y_{B21}J_2e^{-p\tau}}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}
 \end{aligned}$$

Результат выражения (11) показывает, что выполнение трёх итераций без изменения значения вектора свободных членов:

$$J_1(t) = J_1(t - \tau) = J_1(t - 2\tau);$$

$$J_2(t) = J_2(t - \tau) = J_2(t - 2\tau);$$

$$J_3(t) = J_3(t - \tau) = J_3(t - 2\tau) \text{ или } e^{-p\tau} = 1, e^{-2p\tau} = 1,$$

выражения (11) полностью совпадут с выражениями (9). Это означает следующее: при правильной подстройке хотя бы одного из стабилизирующих параметров после выполнения трёх итераций решения систем (5) и (6) всегда будут совпадать.

В результате можно сделать следующие выводы. Схема сшивания обеспечивает устойчивость и сходимость итерационного процесса за две итерации при правильном выборе значений двух стабилизирующих параметров, а при правильном выборе значения только одного стабилизирующего параметра – за три итерации.

Для пояснения вышеприведённых расчётов можно рассмотреть простой пример радиотехнической цепи, состоящей из проводимостей и источников тока, приведённой на Рисунке 5.

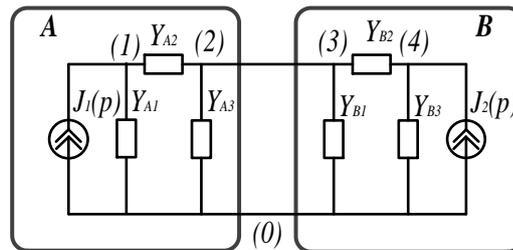


Рисунок 5. Исходная радиотехническая цепь

Эта же цепь, декомпозированная и соединённая схемой сшивания, приведена на Рисунке 6.

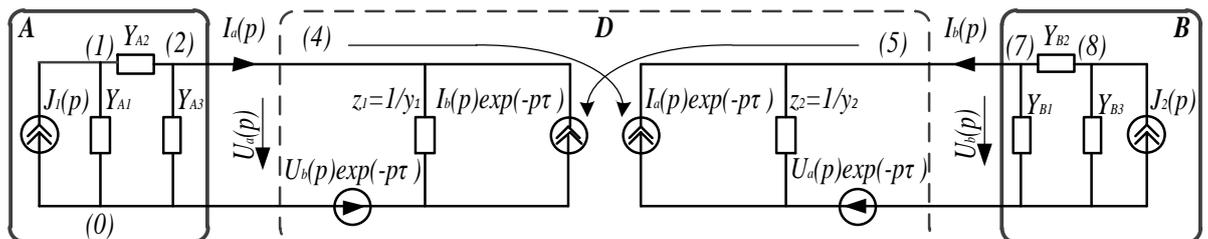


Рисунок 6. Радиотехническая цепь после её декомпозиции

При этом проводимости имеют следующие параметры:  $Y_{A1}=0,01$  См,  $Y_{A2}=0,05$  См,  $Y_{A3}=0,001$  См,  $Y_{B1}=0,02$  См,  $Y_{B2}=0,005$  См,  $Y_{B3}=0,1$  См. Ток источника  $J_1$  имеет постоянное значение  $0,6$  А, а ток источника  $J_2$  изменяется по закону  $3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot n \cdot 4/N)$  А, где  $n$  - номер текущего шага интегрирования, а  $N$  – общее количество шагов интегрирования. В данном эксперименте значение  $N$  будет выбрано равным  $100$ . В таком случае матрицы проводимостей  $Y_A$  и  $Y_B$  примут вид:

$$Y_A = \begin{bmatrix} 0.06 & -0.05 \\ -0.05 & 0.051 \end{bmatrix} \text{ и } Y_B = \begin{bmatrix} 0.025 & -0.005 \\ -0.005 & 0.105 \end{bmatrix}.$$

А состоящая из этих двух частей система, примет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} 0.06 & -0.05 & 0 \\ -0.05 & 0.051 + 0.025 & -0.005 \\ 0 & -0.005 & 0.105 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ 0 \\ J_2 \end{bmatrix}.$$

Также пусть имеется система, составленная на основе вышеприведённой системы, согласно выражению (7):

$$\begin{bmatrix} 0.06 & -0.05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.05 & 0.051 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \frac{1}{z_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{z_2} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.025 & -0.005 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.005 & 0.105 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ I_a \\ U_4 \\ U_5 \\ I_b \\ U_7 \\ U_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{z_2}U_4^{-2} + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)U_5^{-1} - I_a^{-2} \\ -\frac{1}{z_1}U_5^{-2} + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)U_4^{-1} - I_b^{-2} \\ 0 \\ 0 \\ J_4 \end{bmatrix}$$

Целью эксперимента является расчёт и сравнение решений этих двух систем. В исходной и декомпозированной системах сначала будут рассчитываться значения напряжений между нулевым и первым узлами, а затем будут рассчитаны значения напряжений между нулевым и третьим узлами для исходной системы и между нулевым и восьмым узлами для декомпозированной системы. Расчёт будет производиться в программе на MATLAB.

Если значение стабилизирующего параметра  $z_1 = 50$  Ом, а настроенный по правилу (8) стабилизирующий параметр  $z_2 = 107,14$  Ом, то будут получены результаты, представленные на Рисунке 7.

Рисунки 7–11 имеют следующие обозначения:

- сплошная линия – зависимость напряжения  $U_3$  между узлами 3 и 0 исходной системы;
- «кружочки» – зависимость напряжения  $UU_8$  между узлами 8 и 0 декомпозированной системы, от номера шага интегрирования  $n$ .

Если изменить значение стабилизирующего параметр  $z_1$  на равное 200 кОм, а значение стабилизирующего параметра  $z_2$ , как в предыдущем случае, оставить равным 107.14 Ом, то полученные результаты будут иметь вид, представленный на Рисунке 8.

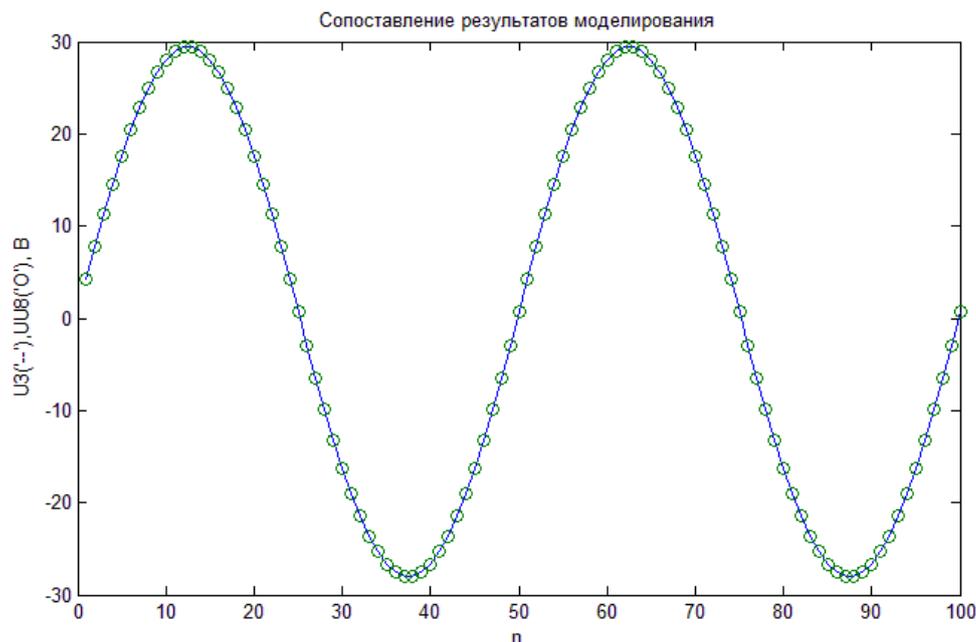


Рисунок 7. Зависимости от номера шага интегрирования  $n$  напряжений между узлами 3 и 0 в исходной ( $U_3$ ) и между узлами 8 и 0 в декомпозированной ( $UU_8$ ) системах при  $z_1=50$  Ом

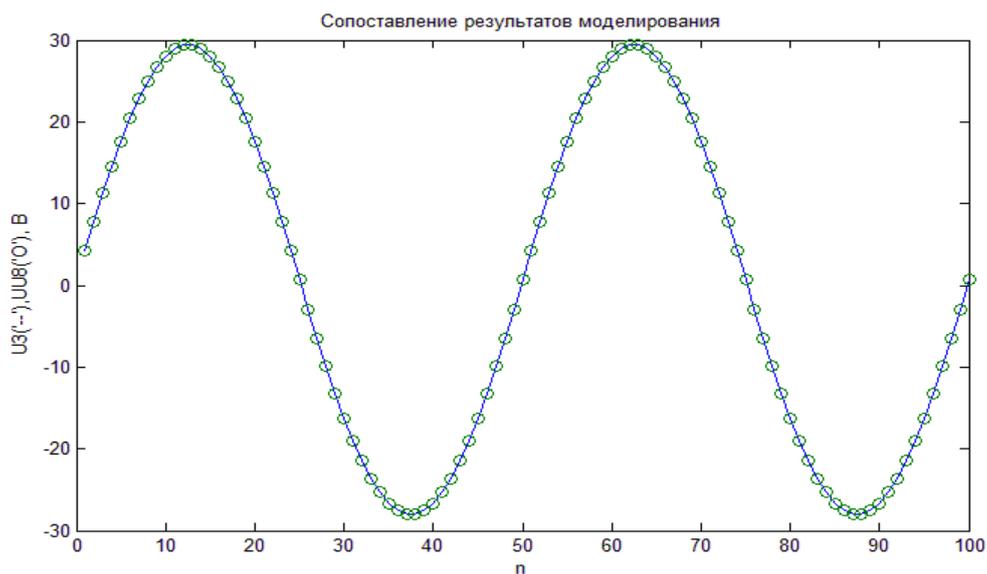


Рисунок 8. Зависимости от номера шага интегрирования  $n$  напряжений между узлами 3 и 0 в исходной ( $U_3$ ) и между узлами 8 и 0 в декомпозированной ( $UU_8$ ) системах при  $z_1=200$  кОм

Если стабилизирующий параметр  $z_1$  настроен по правилу (8) и равен 40,38 Ом, а значение стабилизирующего параметра  $z_2 = 5$ МОм, то полученные результаты будут иметь вид, представленный на Рисунке 9.

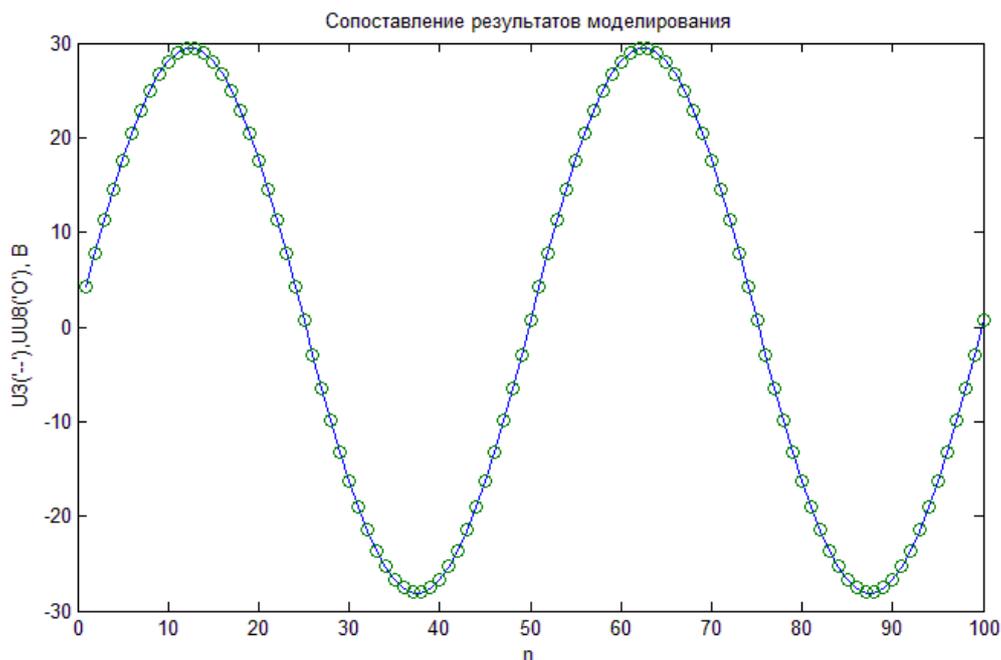


Рисунок 9. Зависимости от номера шага интегрирования  $n$  напряжений между узлами 3 и 0 в исходной ( $U_3$ ) и между узлами 8 и 0 в декомпозированной ( $UU_8$ ) системах при  $z_2=5$  Ом

Если значение стабилизирующего параметра  $z_1$  остаётся равным 40,38 Ом, а значение стабилизирующего параметра  $z_2 = 100$  Ом, то полученные результаты будут иметь вид, представленный на Рисунке 10.

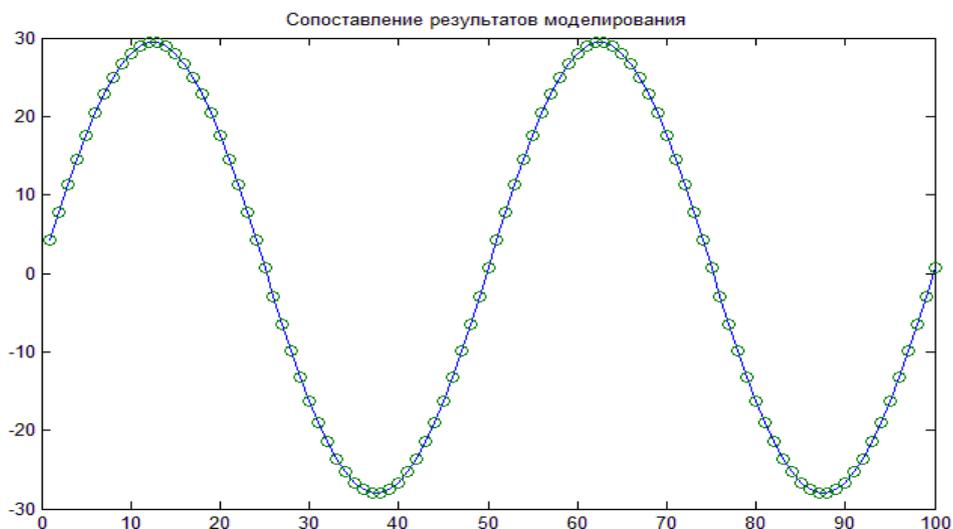


Рисунок 10. Зависимости от номера шага интегрирования  $n$  напряжений между узлами 3 и 0 в исходной ( $U_3$ ) и между узлами 8 и 0 в декомпозированной ( $UU_8$ ) системах при  $z_2=100$  Ом

Если же задаться произвольными значениями  $z_1 = 1$  кОм и  $z_2 = 2$  МОм (без использования дополнения Шура), то полученные результаты будут иметь вид, представленный на Рисунке 11:

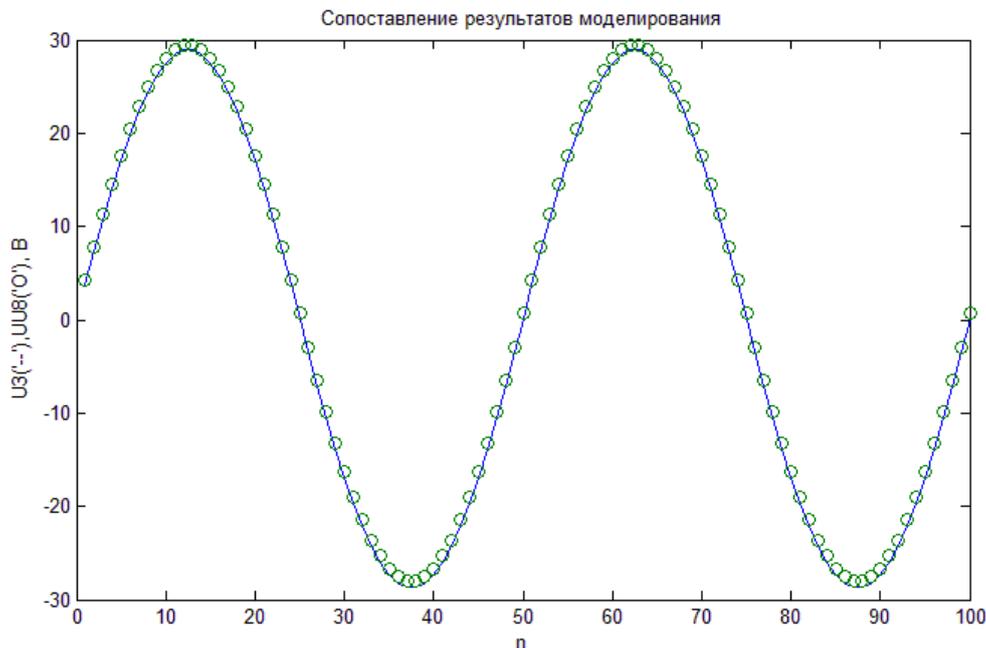


Рисунок 11. – Зависимости от номера шага интегрирования  $n$  напряжений между узлами 3 и 0 в исходной ( $U_3$ ) и между узлами 8 и 0 в декомпозированной ( $U_8$ ) системах при  $z_1 = 1$  кОм и  $z_2 = 2$  МОм

Аналогично, можно получить напряжения между узлами 1 и 0 в исходной ( $U_1$ ) и декомпозированной ( $U_1$ ) системах. Пусть значение стабилизирующего параметра  $z_1$  равно 50 Ом, а стабилизирующий параметр  $z_2$  настроен согласно правилу (8) и равен 107.14 Ом. В таком случае будут получены результаты, представленные на Рисунке 12

Рисунки 12–16 имеют следующие обозначения:

- сплошная линия – зависимость напряжения  $U_1$  между узлами 1 и 0 исходной системы;
  - «кружочки» – зависимость напряжения  $U_1$  между узлами 1 и 0 декомпозированной системы,
- от номера шага интегрирования  $n$ .

Теперь если изменить значение стабилизирующего параметра  $z_1 = 200$  кОм, а значение параметра  $z_2$  как в предыдущем случае оставить равным 107.14 Ом, то будут получены результаты, представленные на Рисунке 12.

Если стабилизирующий параметр  $z_1$  настроен согласно правилу (8) и равен 40,38 Ом, а значение стабилизирующего параметра  $z_2 = 5$  МОм, то в этом случае полученные результаты будут иметь вид, представленный на Рисунке 12.

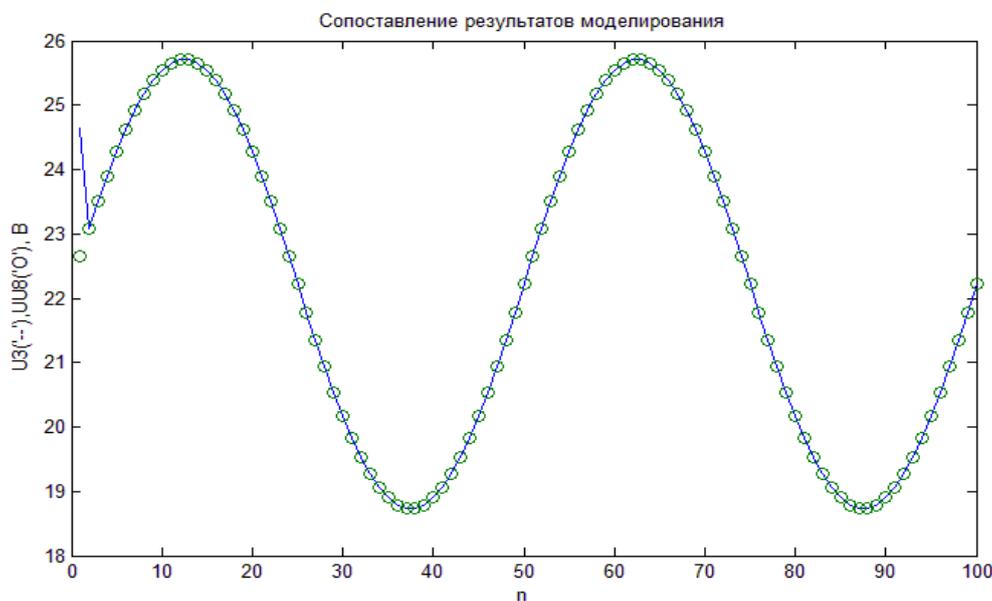


Рисунок 12. Зависимости от номера шага интегрирования  $n$  напряжений между узлами 1 и 0 в исходной ( $U1$ ) и декомпозированной ( $UU1$ ) системах при  $z_1=50$  Ом

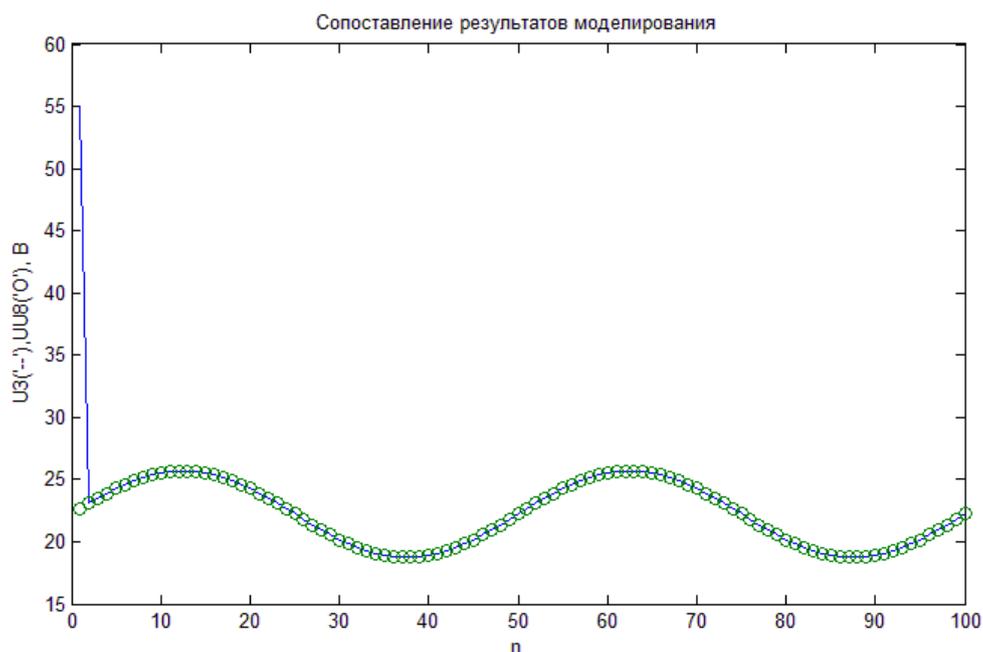


Рисунок 13. Зависимости от номера шага интегрирования  $n$  напряжений между узлами 1 и 0 в исходной ( $U1$ ) и декомпозированной ( $UU1$ ) системах при  $z_1=200$  кОм

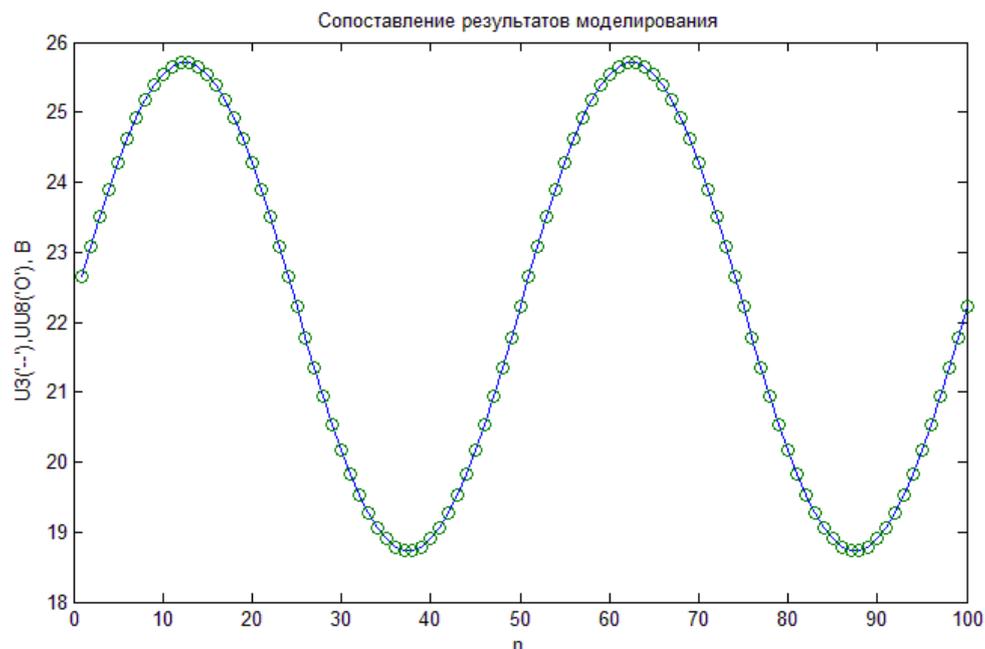


Рисунок 14. Зависимости от номера шага интегрирования  $n$  напряжений между узлами 1 и 0 в исходной ( $U1$ ) и декомпозированной ( $UU1$ ) системах при  $z_2 = 5$  МОм

Если значение параметра  $z_1$  оставить равным 40,38 Ом, а значение параметра  $z_2 = 100$  Ом, то полученные результаты будут иметь вид, представленный на Рисунке 15:

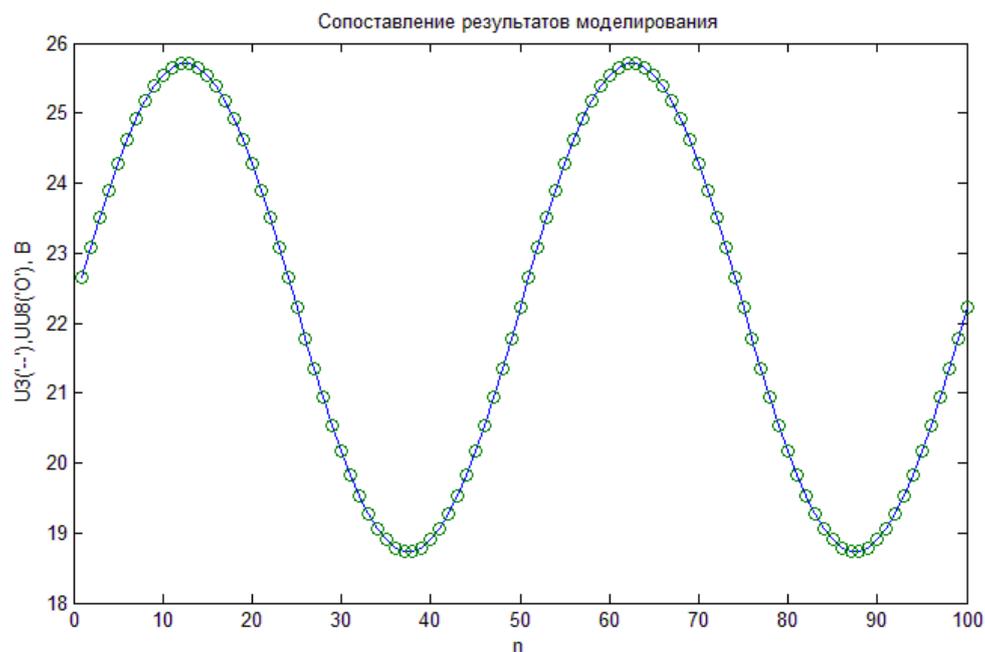


Рисунок 15. Зависимости от номера шага интегрирования  $n$  напряжений между узлами 1 и 0 в исходной ( $U1$ ) и декомпозированной ( $UU1$ ) системах при  $z_2=100$  Ом

Если же стабилизирующие параметры  $z_1$  и  $z_2$  настраивать без использования дополнения Шура, а задать им произвольные значения  $z_1 = 1\text{кОм}$  и  $z_2 = 2\text{МОм}$ , то будут получены результаты, приведённые на Рисунке 16.

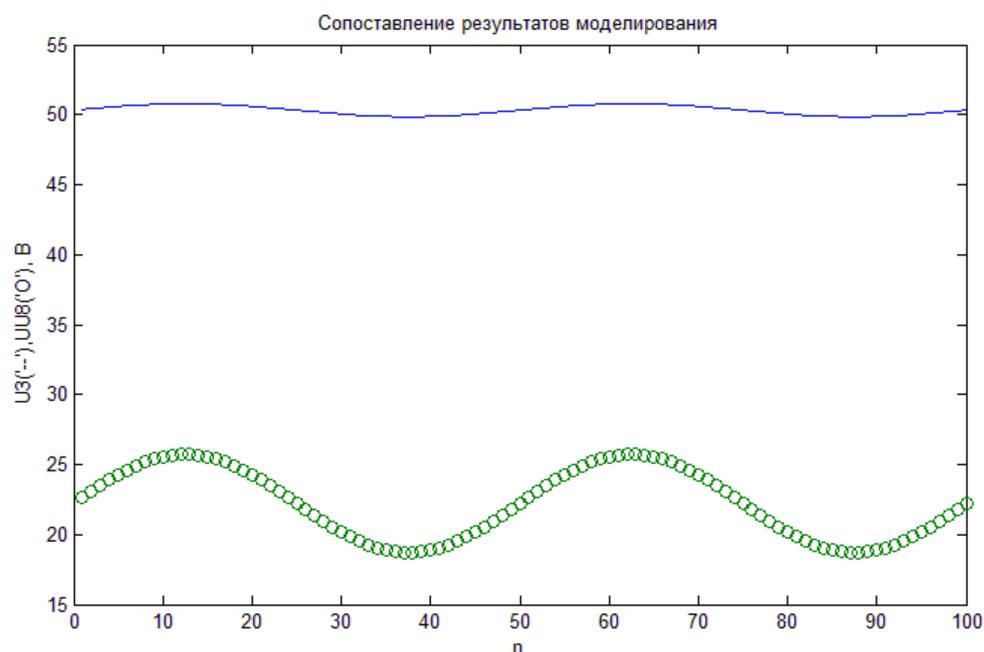


Рисунок 16. – Зависимости от номера шага интегрирования  $n$  напряжений между узлами 1 и 0 в исходной ( $U1$ ) и декомпозированной ( $UU1$ ) системах при  $z_1 = 1\text{кОм}$  и  $z_2=2\text{МОм}$

**Результаты эксперимента.** Анализ Рисунков 7 – 11 показывает совпадение напряжений в декомпозированной системе между узлами 0 и 8 ( $UU8$ ) и в исходной системе между узлами 0 и 3 ( $U3$ ) при корректной настройке как минимум одного из стабилизирующих параметров ( $z_1$  или  $z_2$ ) согласно правилу (8). Из анализа Рисунков 12 – 16 можно сделать аналогичный вывод и для случая, когда совпадают напряжения в декомпозированной системе между узлами 0 и 1 ( $UU1$ ) и в исходной системе между узлами 0 и 1 ( $U1$ ). На Рисунках 12, 13 наблюдается расхождение значений напряжения на первом шаге интегрирования. Это можно объяснить тем, что напряжение снималось в левой части разделённой системы, в то время как правильно был подстроен стабилизирующий параметр в правой части разделённой системы согласно правилу (8), а значение стабилизирующего параметра в левой части системы было задано произвольно. Однако такое явление не закономерно, т.к. в аналогичном случае на Рисунках 9, 10 расхождения в значениях

напряжений на первых итерациях являются минимальными. Интересны также случаи, когда оба стабилизирующих параметра задаются произвольными значениями. Например, на Рисунке 11 присутствуют небольшие расхождения в значениях напряжений на каждой итерации (видно, что центры окружностей на Рисунке 11 не совпадают с проходящей через окружности сплошной линией). Однако, если рассмотреть аналогичный случай на Рисунке 16, то расхождение напряжений будет заметно хорошо. Из чего можно сделать вывод о том, что некорректная подстройка всех стабилизирующих параметров может давать неправильные результаты, что не является приемлемым для моделирования радиотехнических цепей

**Заключение.** Подводя итоги можно сделать следующие выводы: при правильной настройке только одного из стабилизирующих параметров параметры разделённой на части системы и исходной системы все равно сойдутся, следовательно, нет надобности в подстройке обоих стабилизирующих параметров. В этом случае процесс РНЛ-моделирования существенно упрощается, позволяя задать произвольное значение стабилизирующего параметра в аппаратной части и подстроить стабилизирующий параметр в программной модели (численной части) и при этом получить сходимость параметров разбитой на части системы к параметрам исходной системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ren, W., 2007. Accuracy Evaluation of Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Simulation, PhD thesis, Florida State University, Tallahassee, pp: 1-68.
2. Avras, A., A.J. Roscoe and G.M. Burt, 2014. Scalable Real-Time Controller Hardware-In-the-Loop Testing for Multiple Interconnected Converters. The UPEC 2014 conference, IEEE Date Views 02.06.2017 [www.dx.doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620](http://www.dx.doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620).
3. Скляр А.В. Полунатурное моделирование многофункциональных модульных систем. Условия выбора модели. Инженерный вестник Дона, 2017, №2.
4. Шайкин А.С., Шайкина Е.В. Применение комплекса полунатурного моделирования в процессе проектирования информационно-

- измерительных и управляющих систем. Инженерный вестник Дона, 2014, №1.
5. Скляр А.В., Мережин Н.И. Полунатурное моделирование комплексных систем // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении "КомТех-2017": материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Таганрог: ЮФУ, 2017. С. 21-24.
  6. Попов В.П., Максимов М.Н., Мережин Н.И. Об устойчивости и сходимости моделирования по частям // Вестник Южного научного центра РАН. Т.1. № 3. 2005. С. 11-21.
  7. Мережин Н.И. Стенд для аналого-цифрового моделирования с использованием адаптивных схем сшивания // Материалы международной научной конференции «Методы и алгоритмы принятия эффективных решений». Ч.2. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2009. С. 47-51.
  8. Максимов М.Н., Мережин Н.И., Скляр А.В., Мережин Д.Н. Использование оператора Пуанкаре-Стеклова для обеспечения устойчивости РНП моделирования // Сотрудничество стран БРИКС для устойчивого развития: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых стран БРИКС. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. Т.2. С. 81-82.
  9. Копысов С.П. Методы декомпозиции и параллельные распределённые технологии для адаптивных версий метода конечных элементов : дис. ... док. физ.-мат. наук: 05.13.18. Ижевск, 2006. 404 с
  10. Максимов М.Н., Мережин Н.И., Федосов В.П., Лабынцев А.В., Максимов А.А. Эквивалентная схема сшивающего четырехполюсника // Радиотехника и электроника. 2016. Т.61. №2. С. 162-169.
  11. Maksimov M., Merezhin N., Lyashev V., Sinyutin S. Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling. 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2017). Date Views 15.12.2018 [www.doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998531](http://www.doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998531).
  12. Скляр А.В., Максимов М.Н. Расщепление системной матрицы с помощью обобщённой схемы сшивания при полунатурном моделировании радиотехнических цепей// Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск: СФУ, 2018. С. 41-45.

A.V. Sklyar

**ANALYSIS OF THE ADJUSTMENT FOR THE STABILIZING  
PARAMETERS FOR COUPLING PARTS OF THE DECOMPOSED  
RADIO SYSTEM USING THE SCHUR'S COMPLEMENT**

*Southern Federal University, Taganrog, Russia*

*The article continues the cycle of the author's works on the subject of HIL-simulation. The article proposes an algorithm for the decomposition of any radio system and the subsequent coupling of its parts by adjusting only one of the two stabilizing parameters of the coupling scheme. In addition, the possibility of using a coupling scheme as a matching device between fragments of the system through the aspect of system stability was analyzed. All this makes it possible to significantly reduce the amount of debugging work performed in HIL-simulation of radio systems, both in the field of research of elementary systems and in working out options for creating complex multisystems. As a proof of the correctness of the proposed method, an analytical calculation was performed, in general, showing the possibility of adjusting only one stabilizing parameter in the coupling scheme of a decomposed system, while convergence of the parameters of the divided system to the parameters of the original system can be achieved in several iterations. In some cases, this convergence can be achieved in one iteration. In the conclusion of the article, the calculation was performed using a numerical example for practical confirmation of the proposed method. For clarity and correct understanding of the described actions, illustrations are given of both the operations performed and the results of the calculations.*

**Keyword:** stabilizing parameter, system decomposition, coupling scheme, HIL-modeling, radio system, Cramer's rule, Schur complement.

**REFERENCES**

1. Ren, W., 2007. Accuracy Evaluation of Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Simulation, PhD thesis, Florida State University, Tallahassee, pp: 1-68.
2. Avras, A., A.J. Roscoe and G.M. Burt, 2014. Scalable Real-Time Controller Hardware-In-the-Loop Testing for Multiple Interconnected Converters. The UPEC 2014 conference, IEEE Date Views 02.06.2017 [www.dx.doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620](http://www.dx.doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620).
3. Sklyar A.V. Polunaturnoe modelirovanie mnogofunktsional'nykh modul'nykh sistem. Usloviya vybora modeli. Inzhenernyy vestnik Dona, 2017, No.2.
4. Shaykin A.S., Shaykina E.V. Primenenie kompleksa polunaturnogo modelirovaniya v protsesse proektirovaniya informatsionno-izmeritel'nykh i upravlyayushchikh sistem. Inzhenernyy vestnik Dona, 2014, No.1.
5. Sklyar A.V., Merezhin N.I. Polunaturnoe modelirovanie kompleksnykh sistem // Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii "KomTekh-2017": materialy Vserossiyskoy nauchno-

- tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Taganrog: YuFU, 2017. pp. 21-24.
6. Popov V.P., Maksimov M.N., Merezhin N.I. Ob ustoychivosti i skhodimosti modelirovaniya po chastyam // Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN. Vol.1. No. 3. 2005. pp. 11-21.
  7. Merezhin N.I. Stend dlya analogo-tsifrovogo modelirovaniya s ispol'zovaniem adaptivnykh skhem sshivaniya // Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Metody i algoritmy prinyatiya effektivnykh resheniy». Ch.2. – Taganrog: TTI YuFU, 2009. pp. 47-51.
  8. Maksimov M.N., Merezhin N.I., Sklyar A.V., Merezhin D.N. Ispol'zovanie operatora Puankare-Steklova dlya obespecheniya ustoychivosti PHIL modelirovaniya // Sotrudnichestvo stran BRIKS dlya ustoychivogo razvitiya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh stran BRIKS. Rostov-na-Donu: YuFU, 2015. Vol.2. pp. 81-82.
  9. Kopysov S.P. Metody dekompozitsii i parallel'nye raspredelennye tekhnologii dlya adaptivnykh versiy metoda konechnykh elementov : dis. ... dok. fiz.-mat. nauk: 05.13.18. Izhevsk, 2006. 404 p.
  10. Maksimov M.N., Merezhin N.I., Fedosov V.P., Labyntsev A.V., Maksimov A.A. Ekvivalentnaya skhema sshivayushchego chetyrekhpolyusnika // Radiotekhnika i elektronika. 2016. Vol.61. No. 2. pp. 162-169.
  11. Maksimov M., Merezhin N., Lyashev V., Sinyutin S. Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling. 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2017). Date Views 15.12.2018 [www.doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998531](http://www.doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998531).
  12. Sklyar A.V., Maksimov M.N. Rasshcheplenie sistemnoy matritsy s pomoshch'yu obobshchennoy skhemy sshivaniya pri polunaturnom modelirovanii radiotekhnicheskikh tsepey// Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye problemy radioelektroniki». Krasnoyarsk: SFU, 2018. pp. 41-45.