

## Алгоритм декомпозиции и сшивания частей радиотехнической системы при подстройке одного из стабилизирующих параметров

*А.В. Скляр*

*Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, г. Таганрог*

**Аннотация:** В данной статье проанализирована возможность декомпозиции радиотехнической системы на части при условии подстройки одного из двух стабилизирующих параметров схемы сшивания. Произведен аналитический расчёт (в общем виде), доказывающий возможность подстройки только одного стабилизирующего параметра в схеме сшивания. Приведён численный пример, подтверждающий вышеизложенную идею.

**Ключевые слова:** полунатурное моделирование, радиотехническая система, декомпозиция, схема сшивания, стабилизирующий параметр, сшивающий четырехполюсник, идеальная линия задержки, дополнение Шура, правило Крамера, Y-параметры.

Полунатурное моделирование предполагает, что любая радиотехническая система, к примеру – произвольно взятая электрическая цепь, со схемой замещения, приведённой на рис. 1, может быть представлена в виде двух частей – экспериментального макета (аппаратной части) и программной модели (численной части). Такой принцип разделения системы на части называется декомпозицией системы [1].

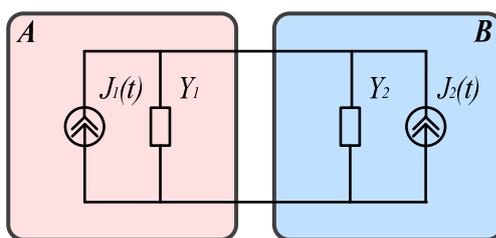


Рис. 1. – Части *A* и *B* исходной системы

Этот метод позволяет проверить работоспособность создаваемой системы ещё до окончания её проектирования с целью выявления если не всех, то значительной части её недостатков, которые без ущерба для проекта устраняются разработчиками, непосредственно используя ресурсы этого

метода. В научной литературе такой метод моделирования называется ННЛ-моделированием [2-9].

Произвольная система, взятая в качестве исходной и показанная на рис. 1, состоит из двух частей **A** и **B**, где  $Y_1$  и  $Y_2$  – представляют собой выходную и входную эквивалентные проводимости соответственно частей **A** и **B** системы. Подразумевается, что одна из этих частей является экспериментальным макетом, а другая – программной моделью. Части **A** и **B** системы представлены эквивалентными источниками тока  $J_1(t)$  и  $J_2(t)$ . Следует отметить, что части **A** и **B** представлены в виде схем замещения.

На рис. 2 эта же система представлена в декомпозированном виде и в операторной форме. Разделённая на две части система соединена с помощью схемы сшивания **D**. Схема сшивания состоит из двух частей, каждая из которых содержит идеализированные источники:

- тока  $I_1(p)\exp(-p\tau)$  и  $I_2(p)\exp(-p\tau)$ ;
- напряжения  $U_1(p)\exp(-p\tau)$  и  $U_2(p)\exp(-p\tau)$

и стабилизирующий элемент  $z_1=1/y_1$  или  $z_2=1/y_2$ .

Таким образом, схема сшивания представляет собой сшивающий четырёхполюсник, необходимый для согласования аппаратной части с численной частью, и позволяющий обеспечивать информационный обмен между частями декомпозированной системы по методу Якоби. Согласно этому методу, решение уравнений электрического равновесия для каждой части системы (как для экспериментального макета, так и для программной модели) выполняются параллельно друг другу. Затем осуществляется обмен данными между частями декомпозированной системы, и опять происходит решение уравнений для каждой части системы и т.д. Временной интервал между  $n$ -ым и  $n+1$ -ым обменом данными между частями системы называется шагом интегрирования или просто шагом. Один шаг интегрирования обычно

---

включает в себя несколько итераций, на каждой из которых решаются уравнения электрического равновесия для декомпозированной системы.

Из рис. 2 видно, что схема шивания, помимо всего прочего, вносит определённую задержку во взаимодействие частей *A* и *B*. Для дальнейшего изложения материала статьи с целью ревизии разбитой на части системы необходимо применить методы анализа радиотехнических цепей [10,11].

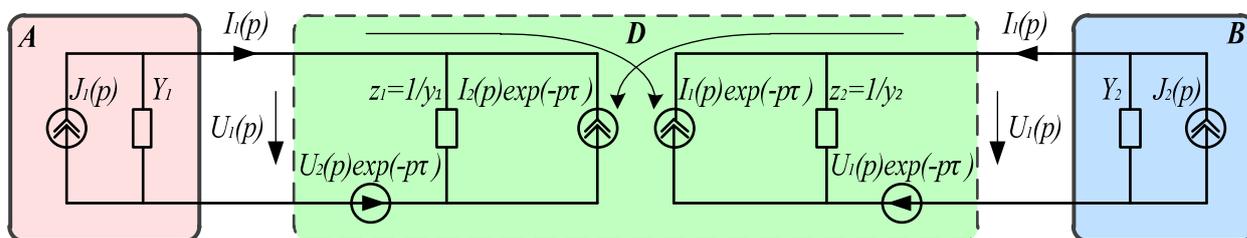


Рис. 2. – Система, разбитая на две части с обобщённой схемой шивания в операторном виде

$Y$  параметры шивающего четырёхполюсника *D* можно записать в следующем виде:

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

На основе  $Y$ -параметров для шивающего четырёхполюсника, имеющего, соответственно, нагрузки  $Y_2$  и  $Y_1$ , определяются:

- эквивалентные входная –  $Y_{11}$  и выходная –  $Y_{22}$  проводимости;
- коэффициенты передачи по току  $G_{12}$ ,  $G_{21}$  и
- коэффициенты передачи по напряжению  $K_{12}$ ,  $K_{21}$

в следующем виде:

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

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

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

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

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

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

Если в выражения  $K_{12}(p)$ ,  $G_{12}(p)$ ,  $Y_{11}(p)$  подставить значения  $1/z_1 = Y_2$ , а в выражения  $K_{21}(p)$ ,  $G_{21}(p)$ ,  $Y_{22}(p)$  значения  $1/z_2 = Y_1$ , то они преобразуются к следующему виду:

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

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

Анализ полученных выражений позволяет сделать следующие выводы. При выборе параметра  $z_1 = 1/Y_2$  наблюдается совпадение напряжений и токов на входе и выходе четырёхполюсника с учётом задержки на один шаг, при этом эквивалентная входная проводимость схемы сшивания будет равна проводимости нагрузки  $Y_2$ . Аналогичным образом, напряжения и токи на входе и выходе четырёхполюсника совпадают с учётом задержки на один шаг, а выходная проводимость схемы сшивания будет равна  $Y_1$ , если выбрать параметр  $z_2 = 1/Y_1$ . Таким образом, в режиме  $z_1=1/Y_2$  и  $z_2=1/Y_1$  четырёхполюсник  $D$  является *идеальной линией задержки*.

Основной целью статьи будет доказательство того, что сходимость параметров разделённой на части системы к параметрам исходной системы можно добиться и в случае, когда правильно настроен только один из двух стабилизирующих параметров

Если определены матрицы параметров, описывающих части  $A$  и  $B$  системы (или радиотехнической цепи) и составленные по методу узловых напряжений, то значения проводимостей системы  $Y_1$  и  $Y_2$  можно вычислить аналитически. Пусть будут даны матрицы второго порядка, описывающие поведение частей  $A$  и  $B$  системы в общем виде, как приведено ниже:

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

В данном случае порядок матрицы не имеет значения, главное – это то, что они «пересекаются» одним коэффициентом [10,11,12]. Кроме того, предполагается, что поведение исходной системы или радиотехнической цепи (не разбитой на части) описывается следующей системой уравнений, составленной по методу узловых напряжений:

$$\begin{bmatrix} Y_{A11} & Y_{A12} & 0 \\ Y_{A21} & Y_{A22} + Y_{B11} & Y_{B12} \\ 0 & Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 + J_3 \\ J_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $U_2 \equiv U_3$ .

В таком случае система, уже разбитая на части  $A$  и  $B$ , будет описываться следующей системой уравнений:

$$\begin{bmatrix} Y_{A11} & Y_{A12} & 0 & 0 \\ Y_{A21} & Y_{A22} + \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \exp(-2p\tau) & -\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right) \exp(-p\tau) & 0 \\ 0 & -\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right) \exp(-p\tau) & \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1} \exp(-2p\tau) & Y_{B12} \\ 0 & 0 & Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Если коэффициенты матриц  $Y_A$  и  $Y_B$  неизвестны, то необходимо добавить в систему ещё два источника напряжения  $E=0$  [12], как показано на рис. 3. В этом случае получится выразить токи  $I_a$  и  $I_b$ , которые втекают в  $D$  со стороны частей  $A$  и  $B$ . В этом случае источники напряжения имеют нулевые значения, поэтому они не поменяют общего решения системы.

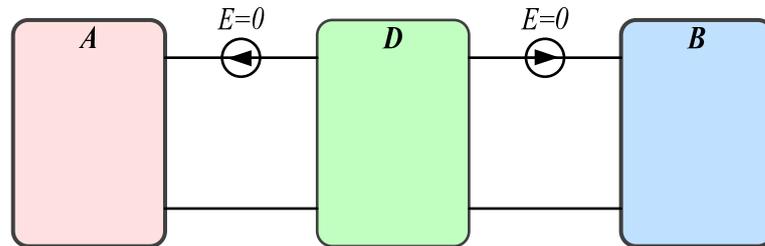


Рис. 3. – Система с добавленными нулевыми источниками напряжения

Тогда система примет вид:

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

После математических преобразований будет получена система, которую необходимо решить:

$$\begin{bmatrix} Y_{A11} & Y_{A12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{A21} & Y_{A22} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \frac{1}{z_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{z_2} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & Y_{B11} & Y_{B12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ I_a \\ U_4 \\ U_5 \\ I_b \\ U_7 \\ U_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ 0 \\ -\frac{1}{z_2}U_4^{-2} + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)U_5^{-1} - I_a^{-2} \\ -\frac{1}{z_1}U_5^{-2} + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)U_4^{-1} - I_b^{-2} \\ 0 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Определить значения  $z_1$  и  $z_2$  системы можно используя следующие выражения:

$$\begin{aligned} z_1 &= 1/Y_2 = Y_{B22} / (Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B12}Y_{B21}) = Y_{B22} / \det(Y_B) \\ z_2 &= 1/Y_1 = Y_{A11} / (Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A12}Y_{A21}) = Y_{A11} / \det(Y_A) \end{aligned} \quad (5)$$

В математике такие преобразования называются дополнением Шура. В случае, когда в знаменателе условия получается ноль, то решение резко упрощается. При этом значение стабилизирующих параметров  $z_1$  следует выбирать равным  $1/Y_{B11}$ , а значение  $z_2$  – равным  $1/Y_{A33}$ .

При правильном выборе значений стабилизирующих параметров  $z_1$  и  $z_2$  система, разбитая на части, решается не итерационным, а прямым методом. Для доказательства этого следует воспользоваться системами (2, 3), выражением (5) и правилом Крамера.

При помощи правила Крамера решение исходной системы (2) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{(Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B12}Y_{B21} + Y_{B22}Y_{A22})J_1 - Y_{B22}Y_{A12}J_2 + Y_{A12}Y_{B12}J_3}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}, \\ U_2 &= \frac{-Y_{B22}Y_{A21}J_1 + Y_{B22}Y_{A11}J_2 - Y_{A11}Y_{B12}J_3}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B21}Y_{B12} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$U_3 = \frac{Y_{B21}Y_{A21}J_1 - Y_{B21}Y_{A11}J_2 + (Y_{A11}Y_{A22} + Y_{A11}Y_{B11} - Y_{A21}Y_{A12})J_3}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B21}Y_{B12} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}.$$

Теперь, используя правило Крамера, можно найти решение разбитой на части системы (3) с условием, что настраивается только один стабилизирующий параметр. Пусть это будет  $z_1$ , тогда  $z_1$  будет вычисляться в соответствии с выражением (5), а  $z_2$  будет иметь произвольное значение. В этом случае необходимо сравнить результаты решений систем (2) и (3). Решение системы (3) будет в следующем виде:

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

$$U_2 = \frac{-Y_{B22}Y_{A21}J_1 + Y_{B22}Y_{A11}J_2 - Y_{A11}Y_{B12}J_3 e^{-p\tau}}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}, \quad (7)$$

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

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

$$U_4 = \frac{\left( \left( Y_{B11}Y_{B22} + \frac{Y_{B22}}{z_2} \right) (Y_{A11}Y_{B11} + Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A21}Y_{A12}) \right) J_3}{(Y_{B22}Y_{B11} - Y_{B12}Y_{B21} + \frac{Y_{B22}}{z_2})(Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12})} +$$

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

$$+ \frac{Y_{A21}Y_{B21}J_1 e^{-p\tau} - Y_{A11}Y_{B21}J_2 e^{-p\tau}}{Y_{B22}Y_{A11}Y_{A22} - Y_{A11}Y_{B12}Y_{B21} + Y_{A11}Y_{B11}Y_{B22} - Y_{B22}Y_{A21}Y_{A12}}.$$

Полученные выражения (7) показывают, что если выполнить три итерации без изменения значения вектора свободных членов, т.е.:

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

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

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

то выражения (7) совпадут с выражениями (6). А это означает, что если правильно подстроены хотя бы один из стабилизирующих параметров и выполнено три итерации, то решение системы (3) всегда совпадает с решением системы (2).

Подводя итог, можно сделать вывод, что при правильном выборе значений двух стабилизирующих параметров схема шивания обеспечивает устойчивость и сходимость итерационного процесса за две итерации, а если правильно выбрано значение только одного параметра, то за три итерации.

В качестве простого примера, поясняющего вышеизложенные расчёты, будет рассмотрена простейшая радиотехническая цепь, состоящая из источников тока и проводимостей, как показано на рисунке ниже:

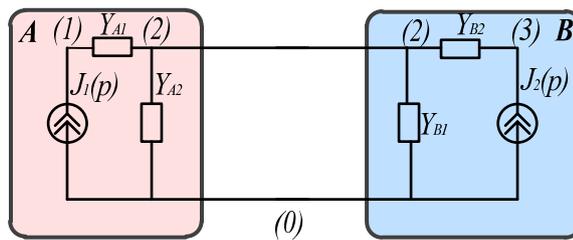


Рис. 4. Исходная радиотехническая цепь

Данная цепь будет подвержена декомпозиции и разделена на 2 части, причем эти части будут соединены схемой шивания (см. рисунок ниже):

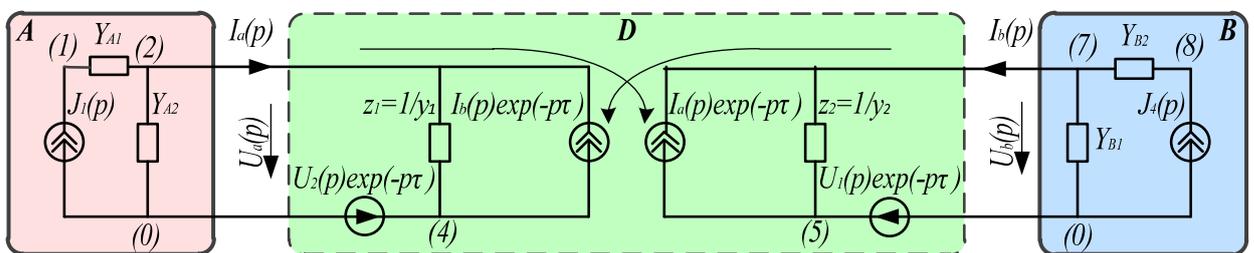


Рис. 5. Радиотехническая цепь после её декомпозиции

Номиналы проводимостей будут иметь следующие значения:  $Y_{A1}=5$  См,  $Y_{A2}=8$  См,  $Y_{B1}=4$  См,  $Y_{B2}=6$  См. Ток источника  $J_1$  будет постоянным и равным 0.1 А, а ток источника  $J_2$  будет изменяться по закону  $\sin(4 \cdot \pi \cdot n \cdot / N)$  А, где  $n$  - номер текущего шага интегрирования, а  $N$  – общее количество шагов

интегрирования. В данном эксперименте значение N будет выбрано равным 50.

Матрицы проводимостей  $Y_A$  и  $Y_B$  в таком случае будут иметь вид:

$$Y_A = \begin{bmatrix} 5 & -5 \\ -5 & 13 \end{bmatrix} \text{ и } Y_B = \begin{bmatrix} 10 & -6 \\ -6 & 6 \end{bmatrix}.$$

Тогда система, состоящая из этих двух частей, будет иметь следующий вид:

$$\begin{bmatrix} 5 & -5 & 0 \\ -5 & 13+10 & -6 \\ 0 & -6 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ 0 \\ J_2 \end{bmatrix}.$$

Также пусть имеется система, составленная на основе вышеприведённой системы, согласно выражению (4):

$$\begin{bmatrix} 5 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 13 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \frac{1}{z_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{z_2} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 10 & -6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ I_a \\ U_4 \\ U_5 \\ I_b \\ U_7 \\ U_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{z_2}U_4^{-2} + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)U_5^{-1} - I_a^{-2} \\ -\frac{1}{z_1}U_5^{-2} + \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1}\right)U_4^{-1} - I_b^{-2} \\ 0 \\ 0 \\ J_4 \end{bmatrix}$$

Целью эксперимента является расчёт и сравнение решений этих двух систем. В исходной и декомпозированной системах будут рассчитываться значения напряжений между нулевым и первым узлами. Пусть такое напряжение для исходной системы будет обозначено как  $U_1$ , а для разбитой на части системы как  $UU_1$ . Расчёт будет производиться в программе на MATLAB.

Пусть значение стабилизирующего параметра  $z_1$  равно 100 Ом, а стабилизирующий параметр  $z_2$  настроен согласно правилу (5) и равен 0.125 Ом. В таком случае будут получены следующие результаты:

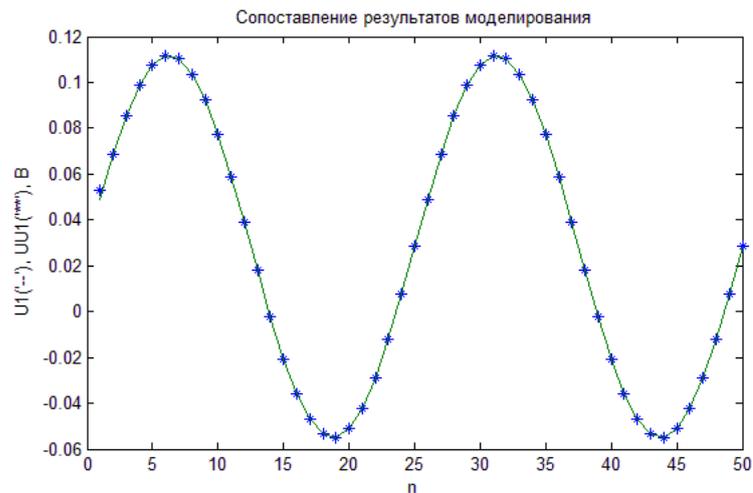


Рис. 6. Напряжение между узлами 1 и 0 в исходной (U1) и декомпозированной (UU1) системах при  $z_1=100$  Ом

На рис. 6–10 сплошной линией обозначена зависимость напряжения U1 между узлами 1 и 0 исходной системы от номера шага интегрирования n. «Звёздочками» обозначена зависимость напряжения UU1 между узлами 1 и 0 декомпозированной системы от номера шага интегрирования n.

Теперь следует изменить значение стабилизирующего параметра  $z_1$ . Пусть значение параметра  $z_1$  равно 1 МОм, а значение параметра  $z_2$  также остаётся равным 0.125 Ом, как и в предыдущем случае. Тогда будут получены следующие результаты:

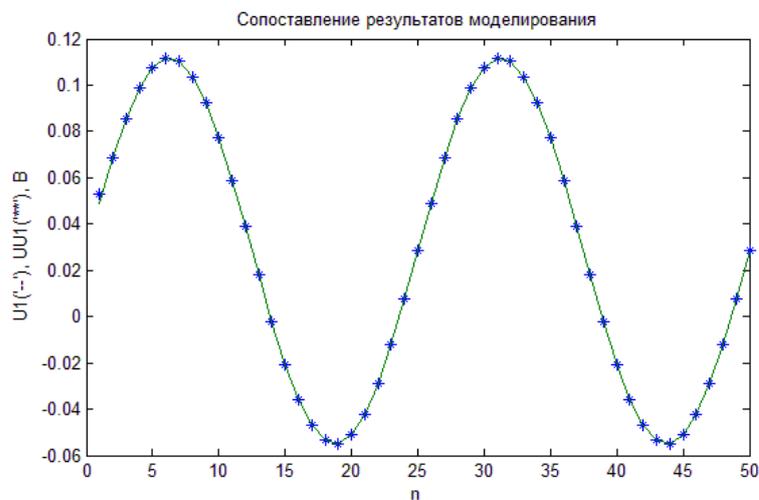


Рис. 7. – Напряжение между узлами 1 и 0 в исходной (U1) и декомпозированной (UU1) системах при  $z_1=1$  МОм

Пусть значение стабилизирующего параметра  $z_2$  равно 100 Ом, а стабилизирующий параметр  $z_1$  настроен согласно правилу (5) и равен 0.25 Ом. В таком случае будут получены следующие результаты:

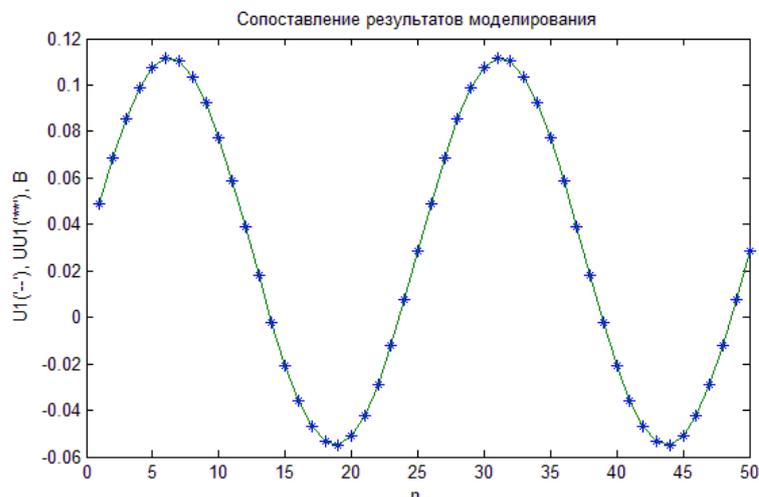


Рис. 8. – Напряжение между узлами 1 и 0 в исходной ( $U1$ ) и декомпозированной ( $UU1$ ) системах при  $z_2=100$  Ом

Если значение параметра  $z_2$  равно 1 МОм, а значение параметра  $z_1$  так же остаётся равным 0.25 Ом, то будут получены следующие результаты:

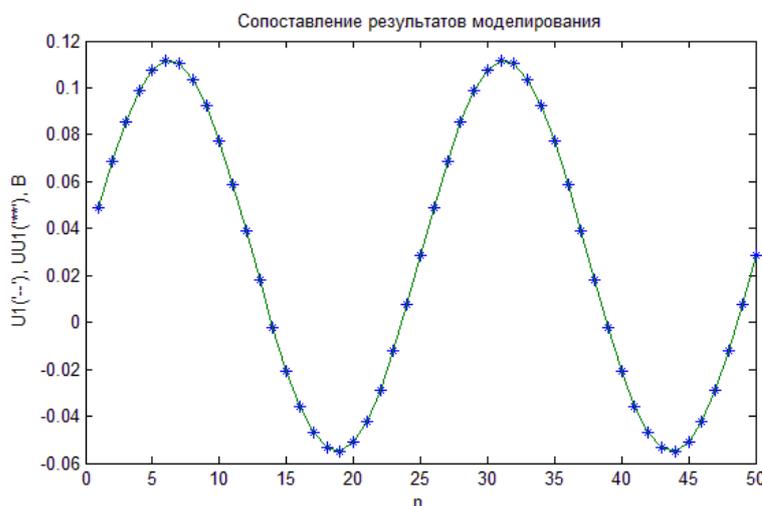


Рис. 9. – Напряжение между узлами 1 и 0 в исходной ( $U1$ ) и декомпозированной ( $UU1$ ) системах при  $z_2=1$  МОм

Если же настраивать стабилизирующие параметры  $z_1$  и  $z_2$  без использования дополнения Шура, а задаться произвольными значениями

(например,  $z_1 = 100\text{кОм}$  и  $z_2=10\text{ Ом}$ ), то будут получены результаты, приведенные на рис. 10:

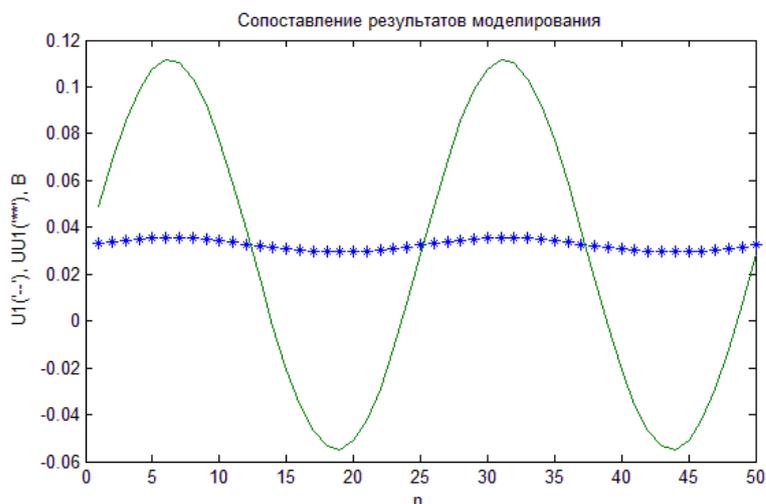


Рис. 10. – Напряжение между узлами 1 и 0 в исходной ( $U_1$ ) и декомпозированной ( $UU_1$ ) системах при значениях стабилизирующих параметров  $z_1=100\text{ кОм}$  и  $z_2=10\text{ Ом}$

Как видно из рис. 6 – 9, напряжение между узлами 0 и 1 декомпозированной системы ( $UU_1$ ) совпадает с напряжением между узлами 0 и 1 исходной системы ( $U_1$ ), если корректно настроен хотя бы один из стабилизирующих параметров ( $z_1$  или  $z_2$ ). Если же оба стабилизирующих параметра настроены неверно (рис. 10), то значения напряжений между узлами 0 и 1 декомпозированной ( $UU_1$ ) и исходной ( $U_1$ ) систем не совпадают. На основе полученных данных можно сделать следующий вывод: если правильно настроен только один из стабилизирующих параметров, то параметры разделённой на части системы все равно сойдутся к параметрам исходной системы, как и было заявлено ранее. В таком случае, нет необходимости подстраивать оба стабилизирующих параметра. Это существенно упростит процесс РНП-моделирования, т.к. подстройка стабилизирующего параметра в аппаратной части является далеко не простой задачей. Можно задаться каким-то определённым значением стабилизирующего параметра в аппаратной части, а подстроить только

стабилизирующий параметр в программной модели (численной части) и в результате получить сходимость параметров разбитой на части системы к параметрам исходной системы.

### Литература

1. 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.

2. Ren, W., 2007. Accuracy Evaluation of Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Simulation, PhD thesis, Florida State University, Tallahassee, pp: 1-68.

3. 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 URL: [dx.doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620](https://doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620).

4. Скляр А.В. Полунатурное моделирование многофункциональных модульных систем. Условия выбора модели. Инженерный вестник Дона, 2017, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4236](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4236)

5. Шайкин А.С., Шайкина Е.В. Применение комплекса полунатурного моделирования в процессе проектирования информационно-измерительных и управляющих систем. Инженерный вестник Дона, 2014, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2248](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2248)

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Максимов М.Н., Мережин Н.И., Скляр А.В., Мережин Д.Н. Использование оператора Пуанкаре-Стеклова для обеспечения устойчивости РНЛ 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.

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 URL: [doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998531](https://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.

### References

1. Kopysov S.P. Metody dekompozitsii i parallel'nye raspredelennye tekhnologii dlya adaptivnykh versiy metoda konechnykh elementov [Decomposition methods and parallel-distributed technologies for adaptive versions of the finite element method]: dis. Ph.D.: 05.13.18. Izhevsk, 2006. 404 p.

2. Ren, W., 2007. Accuracy Evaluation of Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Simulation, PhD thesis, Florida State University, Tallahassee. pp: 1-68.

3. 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. URL: [dx.doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620](https://dx.doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620).

4. Sklyar A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4236](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4236)

5. Shaykin A.S., Shaykina E.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2248](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2248)

6. Sklyar A.V., Merezhin N.I. Polunaturnoye modelirovaniye kompleksnykh sistem [PHIL simulation of complex systems]. Komp'yuternyye i informatsionnyye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii "KomTekh-2017": materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Taganrog: YUFU, 2017. pp. 21-24.

7. Popov V.P., Maksimov M.N., Merezhin N.I. Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN. 2005. Vol.1. № 3. pp. 11-21.

8. Merezhin N.I. Stend dlya analogo-tsifrovogo modelirovaniya s ispol'zovaniem adaptivnykh skhem sshivaniya [Stand for PHIL simulation using adaptive coupling schemes]. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Metody i algoritmy prinyatiya effektivnykh resheniy». Taganrog: TTI YuFU, 2009. Vol.2. pp. 47-51.

9. Maksimov M.N., Merezhin N.I., Sklyar A.V., Merezhin D.N. Ispol'zovanie operatora Puankare-Steklova dlya obespecheniya ustoychivosti PHIL modelirovaniya [The using of the Poincaré-Steklov operator to ensure the stability of the PHIL simulation]. 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.

10. Maksimov M.N., Merezhin N.I., Fedosov V.P., Labyntsev A.V., Maksimov A.A. Radiotekhnika i elektronika. 2016. Vol.61. №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 URL: [doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998531](https://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 [Splitting of the system matrix using a generalized coupling scheme for PHIL simulation of radio engineering circuits]. Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye problemy radioelektroniki». Krasnoyarsk: SFU, 2018. pp. 41-45.