

**М.Н. Максимов, С.М. Максимова**

**ПРИМЕНЕНИЕ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКА ПУАНКАРЕ-СТЕКЛОВА  
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРФЕЙСА ПРИ ПОЛУНАТУРНОМ  
МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ**

*В статье рассматривается возможность применения фильтра Пуанкаре–Стеклова для построения интерфейса при полунатурном моделировании системы. Приводится Z и Y – форма представления четырёхполосника. Полунатурное моделирование (HIL) предполагает разбиение исходной системы на части, причём одна часть моделируется численно на компьютере, а вторая часть представлена реальным физическим объектом. Части системы обмениваются данными друг с другом через программно-аппаратный интерфейс, который может быть реализован по-разному и должен обеспечивать устойчивость, а также сходимость результатов полунатурного моделирования к результатам моделирования исходной системы. Варианты построения программно-аппаратных интерфейсов ITM, TLM, TFA, PCD, DIM, GCS и фильтр Пуанкаре-Стеклова описаны в соответствующих литературных источниках. В статье показано, как исходная система с помощью фильтра Пуанкаре-Стеклова была разбита на части, что соответственно привело к разбиению на части системы уравнений, описывающей поведение исходной системы. Далее были вычислены значения стабилизирующих параметров фильтра Пуанкаре-Стеклова и в соответствии с полученными значениями скорректированы системы уравнений разбитой на части системы. На следующем этапе в статье приводятся результаты численного моделирования исходной и разбитой на части системы в MATLAB. При моделировании по частям части системы обменивались данными друг с другом на каждом шаге моделирования только один раз с задержкой  $\tau$  равной шагу моделирования. Такой способ численного моделирования разбитой на части системы максимально приближен к процессам, происходящим при полунатурном моделировании систем. Сравнение полученных результатов моделирования исходной и разбитой на части системы позволило сделать вывод, что фильтр Пуанкаре-Стеклова при правильном выборе значений стабилизирующих параметров позволяет обеспечить устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования систем.*

*Полунатурное моделирование; устойчивость моделирования по частям; фильтр Пуанкаре-Стеклова.*

**M.N. Maksimov, S.M. Maksimova**

**APPLICATION OF THE FOUR-POLE POINCARÉ-STEKLOV IN INTERFACE  
CONSTRUCTION FOR HARDWARE IN THE LOOP SIMULATION**

*The article considers the possibility of using the Poincaré-Steklov filter to build an interface for hardware in the loop (HIL) simulation of system. The Z and Y forms of the filter representation are given. HIL simulation involves splitting the initial system into parts, with one part being modeled numerically on a computer, and the second part is represented by a real physical object. The parts of the system exchange data with each other through a hardware-software interface, which can be implemented in different ways and should ensure stability, as well as convergence of the results of HIL simulation to the results of modeling the original system. The variants of constructing software and hardware interfaces ITM, TLM, TFA, PCD, DIM, GCS and the Poincaré-Steklov filter are described in the relevant literature sources. The article shows how the original nonlinear system was divided into parts using the Poincaré-Steklov filter, which, accordingly, led to the splitting into parts of the system of equations describing the behavior of the original system. Next, it was shown how the values of the stabilizing parameters of the Poincaré-Steklov filter were calculated and the systems of equations of the system divided into parts were corrected in accordance with the obtained values. At the next stage, the article presents the results of numerical modeling of the initial and partitioned system in MATLAB. When modeling in parts, the parts of the system exchanged data with each other at each step of the simulation only once with a delay of  $h$ . This meth-*

od of numerical modeling of a system divided into parts is as close as possible to the processes occurring during semi-natural modeling of systems. A comparison of the obtained simulation results of the initial and the system divided into parts allowed us to conclude that the Poincare-Steklov filter, with the correct choice of the values of the stabilizing parameters, allows for the stability and convergence of the results of semi-natural modeling of both linear and nonlinear systems.

Hardware in the loop simulation; stability of hardware in the loop simulation; Poincare-Steklov filter.

**Введение.** В статье рассматривается возможность применения фильтра Пуанкаре–Стеклова для построения интерфейса при полунатурном моделировании системы.

Полунатурное моделирование предполагает, что система разбивается на части и одна часть системы моделируется численно, а другая часть системы представлена реальным физическим объектом. При этом на каждом шаге части системы через программно-аппаратный интерфейс обмениваются между собой данными (рассчитанными и измеренными значениями величин) с некоторой задержкой  $\tau$ .

В литературе описаны различные варианты построения программно-аппаратных интерфейсов ITM, TLM, TFA, PCD, DIM [1–5], GCS [6–15], фильтр Пуанкаре–Стеклова [16, 17], которые должны обеспечивать устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования к результатам моделирования исходной системы.

В статье показано, что фильтра Пуанкаре–Стеклова при правильном выборе параметров может обеспечить устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования систем.

**Постановка задачи.** В статье необходимо рассмотреть возможность применения четырёхполосника Пуанкаре–Стеклова для построения интерфейса при полунатурном моделировании систем, а также исследовать устойчивость и сходимость результатов моделирования системы по частям при использовании этого интерфейса.

Фильтр Пуанкаре–Стеклова в его Z и Y-форме изображены на рис. 1 и 2. Свойства фильтра/четырёхполосника подробно описаны в [16, 17].

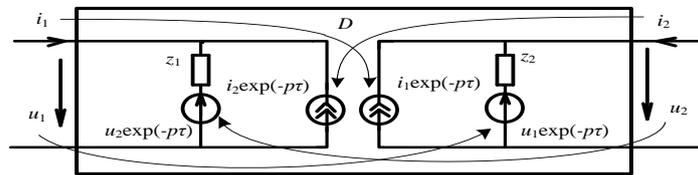


Рис. 1. Z-форма четырёхполосника Пуанкаре–Стеклова

Z-параметры четырёхполосника Пуанкаре–Стеклова для данного представления приведены ниже:

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{z_1 + z_2 e^{-2p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} & \frac{(z_1 + z_2) e^{-p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} \\ \frac{(z_1 + z_2) e^{-p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} & \frac{z_2 + z_1 e^{-2p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} \end{bmatrix}$$

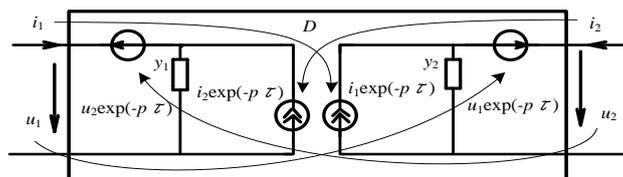


Рис. 2. Y-форма четырёхполосника Пуанкаре–Стеклова

Y-параметры четырёхполюсника Пуанкаре-Стеклова для данного представления приведены ниже:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{y_1 + y_2 e^{-2p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} & \frac{-(y_1 + y_2) e^{-p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} \\ \frac{-(y_1 + y_2) e^{-p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} & \frac{y_2 + y_1 e^{-2p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} \end{bmatrix},$$

Как видно из рис. 1 и 2 фильтр Пуанкаре-Стеклова (D) состоит из управляемых источников тока и напряжения, значения которых равны значениям соответствующих токов и напряжений на входах четырёхполюсника, задержанных на величину  $\tau$ . Проводимости/сопротивления  $y_1/z_1$  и  $y_2/z_2$  называются стабилизирующими элементами (параметрами). Значения стабилизирующих элементов *всегда являются действительными числами* (отсутствует реактивная составляющая) и существенно влияют на устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования.

Предположим, что исходная система представлена двумя частями A и B, поведение каждой из которых описывается матрицами 2-го порядка (порядок матрицы не имеет значения главное то, что они имеют один «общий» узел, т.е. «пересекаются» одним коэффициентом)

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}.$$

При этом предполагаем, что поведение исходной (не разбитой на части) системы описывается системой уравнений, приведенной ниже:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} + B_{11} & B_{12} \\ 0 & B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix}.$$

Будем считать, что эта система уравнений была составлена с помощью модифицированного метода узловых потенциалов [19].

Разобьём эту систему на части с помощью Y-формы фильтра Пуанкаре-Стеклова, причём это можно сделать двумя способами: непосредственно по принципиальной схеме четырёхполюсника или с помощью Y-параметров данного четырёхполюсника.

Продемонстрируем первый способ разбиение системы на части (непосредственно по принципиальной схеме четырёхполюсника):

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ I_{e_1^{-1}} \\ U_{y_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_{21} \\ e_1^{-1} \\ j_1^{-1} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} y_2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & B_{11} & B_{12} \\ 0 & 0 & B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{y_2} \\ I_{e_2^{-1}} \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_2^{-1} \\ e_2^{-1} \\ J_{22} \\ J_3 \end{bmatrix},$$

где  $e_1^{-1} = u_2 \exp(-p\tau)$ ,  $j_1^{-1} = i_2 \exp(-p\tau)$ ,  $e_2^{-1} = u_1 \exp(-p\tau)$ ,  $j_2^{-1} = i_1 \exp(-p\tau)$  это управляемые источники четырёхполюсника (с помощью верхнего индекса -1 подчёркивается, что значение взято с предыдущего шага);  $I_{e_1^{-1}}$  и  $I_{e_2^{-1}}$  это ток, протекающий через источники  $e_1^{-1}$  и  $e_2^{-1}$  соответственно;  $J_{21}$  и  $J_{22}$  – это независимые источники тока подключённые к общему узлу со стороны части A и B соответственно (т.е.  $J_2 = J_{21} + J_{22}$ ).

Продемонстрируем второй способ разбиение системы на части (с помощью Y-параметров четырёхполюсника):

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} + \frac{y_1+y_2e^{-2p\tau}}{(1-e^{-2p\tau})} & -\frac{(y_2+y_1)e^{-p\tau}}{(1-e^{-2p\tau})} & 0 \\ 0 & -\frac{(y_2+y_1)e^{-p\tau}}{(1-e^{-2p\tau})} & B_{11} + \frac{y_2+y_1e^{-2p\tau}}{(1-e^{-2p\tau})} & B_{12} \\ 0 & 0 & B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_{21} \\ J_{22} \\ J_3 \end{bmatrix},$$

после преобразований получим:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} + y_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{11} + y_2 & B_{12} \\ 0 & 0 & B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_{21} - J_{21-2} + A_{21}U_{1-2} + A_{22} * U_{2-2} - y_2U_{2-2} + (y_1 + y_2)U_{3-1} \\ J_{22} - J_{22-2} + B_{11}U_{3-2} + B_{12} * U_{4-2} - y_1U_{3-2} + (y_1 + y_2)U_{2-1} \\ J_3 \end{bmatrix}$$

где с помощью отрицательного верхнего индекса -1 и -2, показывается, что значение берётся с задержкой на  $\tau$  и  $2\tau$  соответственно;  $J_{21-1} = A_{21}U_{1-2} + A_{22} * U_{2-2}$ ,  $J_{22-1} = B_{11}U_{3-2} + B_{12} * U_{4-2}$ .

Таким образом, использование Y-параметров четырёхполюсника позволило избавиться от управляемых источников напряжения  $e_1$  и  $e_2$  в четырёхполюснике, но усложнило управление источниками тока  $j_1$  и  $j_2$ .

Аналогичный (дуальный) результат можно получить, используя метод контурных токов для составления системы уравнений, описывающих исходную систему и Z-форму фильтра Пуанкаре-Стеклова, чтобы разбить её на части.

**Разбиение исходной системы на части.** Рассмотрим исходную систему, изображённую на рис. 3. На вход системы подаётся напряжение в виде меандра, индуктивность  $L_1 = L_2 = 1\text{мГн}$ ,  $Y_1 = Y_2 = Y_4 = 1000\text{См}$ ,  $Y_3 = 0.5\text{См}$ ,  $C_1 = 3\text{е-}3$ .

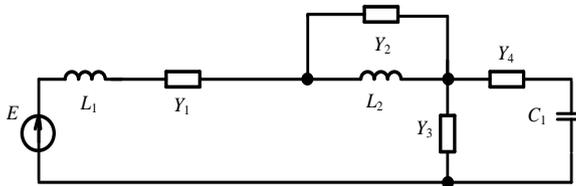


Рис. 3. Исходная система

Интерес к исследованию таких систем возникает при использовании ПИД технологии для моделирования работы трёхфазных инверторов.

Разобьём исходную систему на части с помощью фильтра Пуанкаре-Стеклова как показано на рис. 4.

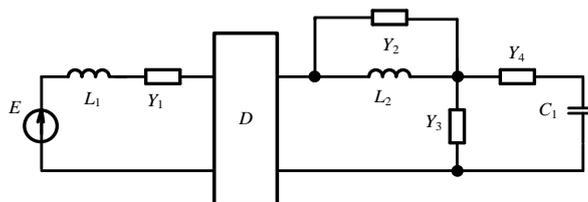


Рис. 4. Разбитая на части система

Аналогично описанному выше, составим с помощью модифицированного метода узловых потенциалов и Y-формы фильтра Пуанкаре Стеклова систему уравнений описывающих поведение исходной системы и разбитой на части. Причём при составлении уравнений системы разбитой на части применим оба способа, описанных выше, чтобы убедиться, что они дают эквивалентные результаты.

Кроме того, промоделируем и сопоставим решения исходной системы и разбитой на части при использовании двух разных методов численного решения системы дифференциальных уравнений: обратной формулы Эйлера и метода трапеции.

**Результаты моделирования системы по частям.** Промоделируем с шагом  $h = 1\text{ мс}$  исходную и разбитую на части систему в MATLAB [21], при этом части системы будут обмениваться данными друг с другом на каждом шаге моделирования только один раз, т.е. задержка  $\tau = h = 1\text{ мс}$ . Такой способ численного моделирования разбитой на части системы максимально приближен к процессам, происходящим при полунатурном моделировании систем.

Результатом моделирования будет сопоставление тока через  $L_1$  и напряжения на  $C_1$  у исходной системы и системы разбитой на части.

Ниже на рис. 5 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании *обратной формулы Эйлера* и первого способа разбиения системы на части. Перед моделированием с помощью дополнения Шура [20] были вычислены значения стабилизирующих элементов  $y_2 = 0.999$ ,  $y_1 = 3.4789$ .

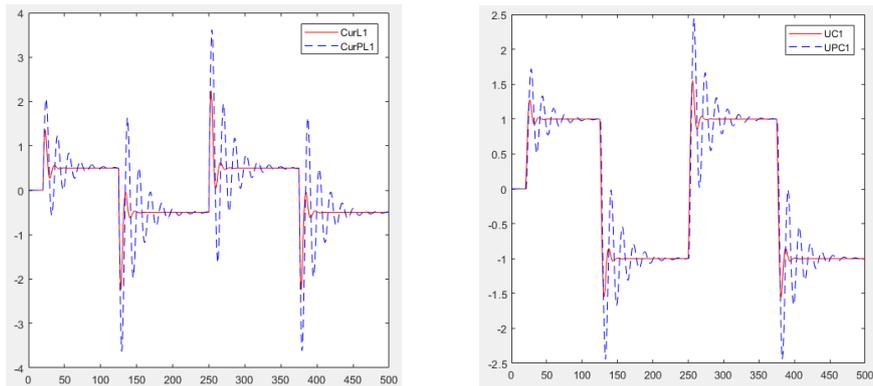


Рис. 5. Графики изменения тока через  $L1$  и напряжения на  $C1$  у исходной системы ( $CurL1$ ,  $UC1$ ) и разбитой на части ( $CurPL1$ ,  $UPC1$ ) при  $y_2 = 0.999$ ,  $y_1 = 3.4789$

Как видно из рис. 5 процесс полунатурного моделирования устойчив, но медленно сходится к результатам моделирования исходной системы.

Ниже на рис. 6 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании обратной формулы Эйлера, но значения стабилизирующих элементов были выбраны равными, т.е.  $y_1 = y$ ;  $y_2 = y$ ; где  $y = (0.999 + 3.4789) / 2 = 2.2389$  – среднее значение.

Как видно из рис. 6 процесс полунатурного моделирования устойчив и по сравнению с результатами эксперимента, изображёнными на рис. 5, сходится быстрее.

Результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании *обратной формулы Эйлера* и *второго способа разбиения системы на части* полностью совпадают с результатами первого способа, поэтому здесь не приводятся.

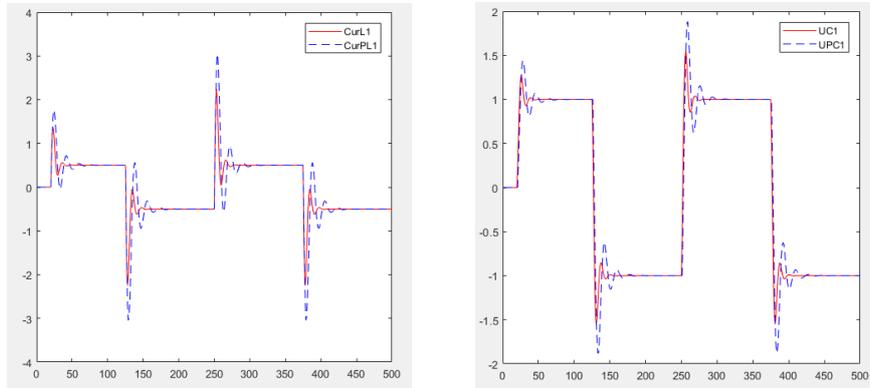


Рис. 6. Графики изменения тока через  $L_1$  и напряжения на  $C_1$  у исходной системы ( $CurL1$ ,  $UC1$ ) и разбитой на части ( $CurPL1$ ,  $UPC1$ ) при  $y_1 = y_2 = 2.2389$

На рис. 7 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании метода трапеции и первого способа разбиения системы на части. Перед моделированием с помощью дополнения Шура были вычислены значения стабилизирующих элементов  $y_2 = 0.49975$ ,  $y_1 = 6.4227$ .

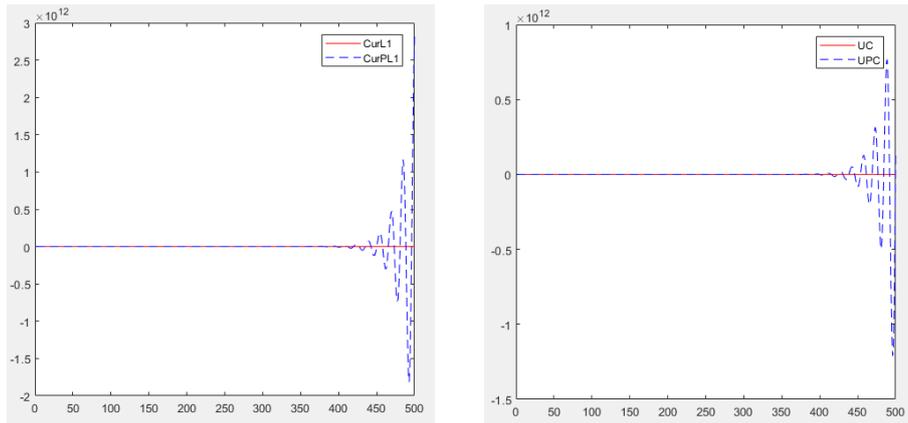


Рис. 7. Графики изменения тока через  $L1$  и напряжения на  $C1$  у исходной системы ( $CurL1$ ,  $UC1$ ) и разбитой на части ( $CurPL1$ ,  $UPC1$ ) при  $y_2 = 0.49975$ ,  $y_1 = 6.4227$

Как видно из рис. 7 процесс полунатурного моделирования системы становится неустойчивым.

Ниже на рис. 8 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании метода трапеции, но значения стабилизирующих элементов были выбраны равными, т.е.  $y_1 = y$ ;  $y_2 = y$ ; где  $y = (0.49975 + 6.4227)/2 = 3.4612$  – среднее значение.

Как видно из рис. 8 при выборе  $y_1 = y_2 = 3.4612$  процесс полунатурного моделирования становится устойчивым. Кроме того, видно отличие результатов моделирования исходной системы при использовании обратной формулы Эйлера и метода трапеций. Метод трапеции точнее, но менее устойчив.

Результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании метода трапеции и второго способа разбиения системы на части полностью совпадают с результатами первого способа, поэтому здесь не приводятся.

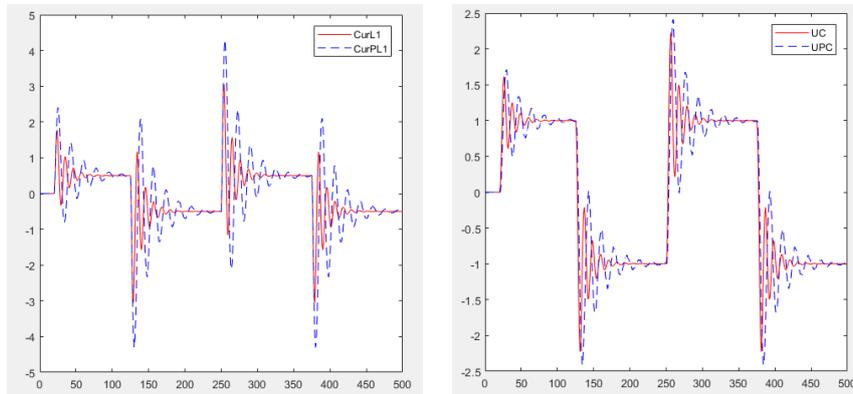


Рис. 8. Графики изменения тока через  $L_1$  и напряжения на  $C_1$  у исходной системы ( $CurL1$ ,  $UC1$ ) и разбитой на части ( $CurPL1$ ,  $UPC1$ ) при  $y_1 = y_2 = 3.4612$

На рис. 9 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании метода трапеции и выполнения не одной, а *двух итераций* на каждом шаге. Перед моделированием с помощью дополнения Шура были вычислены значения стабилизирующих элементов  $y_2=0.49975$ ,  $y_1 = 6.4227$ .

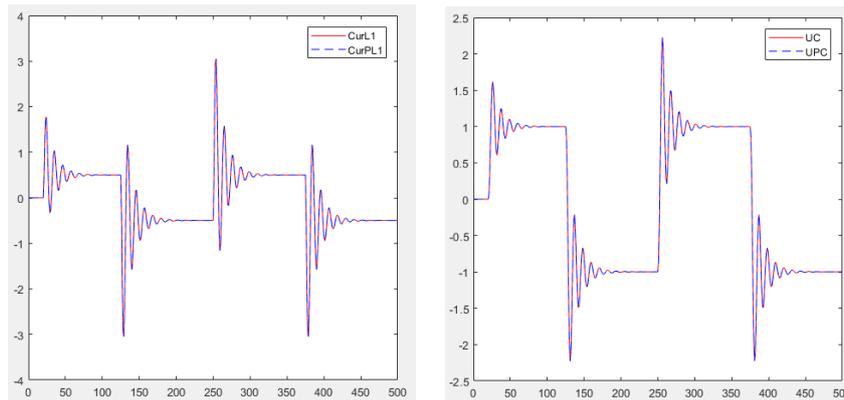


Рис. 9. Графики изменения тока через  $L_1$  и напряжения на  $C_1$  у исходной системы ( $CurL1$ ,  $UC1$ ) и разбитой на части ( $CurPL1$ ,  $UPC1$ ) при  $y_2 = 0.49975$ ,  $y_1 = 6.4227$  и выполнении *двух итераций* на каждом шаге

Как видно из графиков при выполнении двух итераций на каждом временном шаге результаты моделирования исходной системы и разбитой на части совпали. Это подтверждает ранее полученные теоретические результаты, но при полунатурном моделировании возможна только одна итерация.

**Заключение.** Таким образом, анализируя полученные результаты, можно прийти к следующим выводам:

- ◆ устойчивость результатов полунатурного моделирования зависит от порядка метода интегрирования (при использовании обратной формулы Эйлера добиться устойчивости проще, но точность их хуже);
- ◆ предыдущие теоретические результаты по анализу устойчивости процесса моделирования системы по частям с использованием фильтра Пуанкаре-Стеклова, предполагают наличие трёх или хотя бы двух итераций на каждом шаге моделирования, но при полунатурном моделировании есть только *одна итерация*, поэтому практические результаты могут не совпадать с теоретическими;

◆ при полунатурном моделировании значение стабилизирующих элементов лучше задавать равными, выбрав их из диапазона  $[y_1, y_2]$ .

Следовательно, четырёхполюсник Пуанкаре-Стеклова можно применять для построения интерфейсов взаимодействия частей системы при полунатурном моделировании, но с учётом выше приведённых выводов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ren W., Steurer M., Baldwin T.L.* Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms // IEEE Transactions on Industry Applications. – Jul/Aug 2008. – Vol. 44, No. 4. – P. 1286-1294.
2. *Santi E., Siegers J.* Improved power hardware-in-the-loop interface algorithm using wideband system identification // Twenty-Ninth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2014. – P. 1198-1204.
3. *Tucker J.* Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Considerations and Implementation Methods for Electrically Coupled Systems // MS Thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina, 2011.
4. *Mersenski R.* Evaluation of a New Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Interface Algorithm for Current Controlled Amplifiers // M.S. thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina, 2011.
5. *Paran S., Edrington C.S.* Improved power hardware in the loop interface methods via impedance matching // Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium. – April 2013. – P. 342-346.
6. *Дмитриев-Здоров В.Б., Ляшев В.А., Максимов М.Н.* Реализация распределенного моделирования электрических цепей в локальных вычислительных сетях // Телекоммуникации. – 2001. – № 11. – С. 15-19.
7. *Dmitriev-Zdorov V., Dougle R., Lyashev V., Maksimov M., Popov V., Solodovnik E.* Distributed Simulation of the Electromechanical System in the VTB // Fifth IASTED International Conference Power and Energy Systems (PES 2001) in Tampa, FL, November 19-22, 2001.
8. *Dmitriev-Zdorov V.B., Ljashev V.A., Maksimov M.N.* Modified concurrent relaxation method and improving the stability of numerical analysis by partitioning // Conf. IT-2002, part#3. – Taganrog: TSURE, 2002. – P. 5-37.
9. *Дмитриев-Здоров В.Б., Максимов М.Н.* Моделирование по частям // Матер. международной научной конференции «Динамика процессов в природе, обществе и технике; информационные аспекты». – Ч. 2. – Таганрог: ТРТУ, 2003. – 108 с.
10. *Максимов М.Н.* Распределенное моделирование системы разбитой на три части // Матер. международной научной конференции «Системный подход в науках о природе, человеке и технике». – Ч. 5. – Таганрог: ТРТУ, 2004. – С. 32-37.
11. *Попов В.П., Максимов М.Н., Мерёжин Н.И.* Об устойчивости и сходимости моделирования по частям. Российская Академия наук // Вестник южного научного центра. – 2005. – Т. 1. – Вып. 3. – С. 11-21.
12. *Dmitriev-Zdorov V.B., Maksimov M.N., Popov V.P., Bastos J., Monti A., Dougal R.* Generalized Coupling Scheme for Distributed Simulations of Power Systems // Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, March 2006.
13. *Максимов М.Н.* Технология моделирования систем по частям // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011): Тр. международной научной конференции (Москва, 28 марта – 1 апреля 2011 г.). – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. – 705 с. – ISBN 978-5-696-04090-5.
14. *Lyashev V.* Stability of Concurrent Relaxation Algorithm // Izvestia SFedU. Engineering Science. – 2010. – No. 2. – P. 39-45.
15. *Lyashev V.* Accuracy issue in delayed feed-back decomposition systems // Izvestia SFedU. Engineering Science. – 2010. – No. 1. – P. 201-204.
16. *Максимов М.Н., Мерёжин Н.И., Федосов В.П., Лабынцев А.В., Максимов А.А.* Эквивалентная схема шивающего четырехполюсника // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 2. – С. 162-169. – ISSN 1064 2269. – <http://elibrary.ru/item.asp?id=25069547>.
17. *Mikhail Maksimov, Llyashev Vladimir, Merezhin Nikolay, Sinyutin Sergey.* Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2017. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998531.
18. *Popov V.* Fundamentals of Circuit Theory. – Moscow: YuRight Publishing, 2013. – 285 p.

19. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
20. The Schur Complement and Its Applications / ed. by Fuzhen Zhang. Series: Numerical Methods and Algorithms. – Springer Verlag, 2005. – Vol. 4. – 295 p.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021668540 «Программа для полунатурного моделирования нелинейной системы с использованием четырехполосного представления фильтра Пуанкаре-Стеклова».

## REFERENCES

1. Ren W., Steurer M., Baldwin T.L. Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Jul/Aug 2008, Vol. 44, No. 4, pp. 1286-1294.
2. Santi E., Siegers J. Improved power hardware-in-the-loop interface algorithm using wideband system identification, *Twenty-Ninth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2014, pp. 1198-1204.
3. Tucker J. Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Considerations and Implementation Methods for Electrically Coupled Systems, *MS Thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina, 2011*.
4. Mersenski R. Evaluation of a New Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Interface Algorithm for Current Controlled Amplifiers, *M.S. thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina, 2011*.
5. Paran S., Edrington C.S. Improved power hardware in the loop interface methods via impedance matching, *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, April 2013, pp. 342-346.
6. Dmitriev-Zdorov V.B., Lyashev V.A., Maksimov M.N. Realizatsiya raspredelennoogo modelirovaniya elektricheskikh tsepey v lokal'nykh vychislitel'nykh setyakh [Implementation of distributed modeling of electrical circuits in local area networks], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2001, No. 11, pp. 15-19.
7. Dmitriev-Zdorov V., Dougle R., Lyashev V., Maksimov M., Popov V., Solodovnik E. Distributed Simulation of the Electromechanical System in the VTB, *Fifth IASTED International Conference Power and Energy Systems (PES 2001) in Tampa, FL, November 19-22, 2001*.
8. Dmitriev-Zdorov V.B., Lyashev V.A., Maksimov M.N. Modified concurrent relaxation method and improving the stability of numerical analysis by partitioning, *Int. Conf. IT-2002, part#3*. – Taganrog: TSURE, 2002, pp. 5-37.
9. Dmitriev-Zdorov V.B., Maksimov M.N. Modelirovanie po chastyam [Modeling in parts], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Dinamika protsessov v prirode, obshchestve i tekhnike; informatsionnye aspekty»* [Materials of the international scientific conference "Dynamics of processes in nature, society and technology; information aspects"]. Part 2. Taganrog: TRTU, 2003, 108 p.
10. Maksimov M.N. Raspredelennoe modelirovanie sistemy razbitoy na tri chasti [Distributed modeling of a system divided into three parts], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sistemnyy podkhod v nauках o prirode, cheloveke i tekhnike»* [Materials of the international scientific conference "A systematic approach in the sciences of nature, man and technology"]. Part 5. Taganrog: TRTU, 2004, pp. 32-37.
11. Popov V.P., Maksimov M.N., Merezhin N.I. Ob ustoychivosti i skhodimosti modelirovaniya po chastyam. Rossiyskaya Akademiya nauk [On the stability and convergence of modeling in parts. Russian Academy of Sciences], *Vestnik yuzhnogo nauchnogo tsentra* [Bulletin of the Southern Scientific Center], 2005, Vol. 1, Issue 3, pp. 11-21.
12. Dmitriev-Zdorov V.B., Maksimov M.N., Popov V.P., Bastos J., Monti A., Dougal R. Generalized Coupling Scheme for Distributed Simulations of Power Systems, *Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, March 2006*.
13. Maksimov M.N. Tekhnologiya modelirovaniya sistem po chastyam [Technology of systems modeling in parts], *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2011): Tr. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Moskva, 28 marta – 1 aprelya 2011 g.)* [Parallel computing technologies (PaVT'2011): Proceedings of the International Scientific Conference (Moscow, March 28 - April 1, 2011)]. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2011, 705 p. ISBN 978-5-696-04090-5.
14. Lyashev V. Stability of Concurrent Relaxation Algorithm, *Izvestia SFedU. Engineering Science*, 2010, No. 2, pp. 39-45.

15. *Lyashev V.* Accuracy issue in delayed feed-back decomposition systems, *Izvestia SFedU. Engineering Science*, 2010, No. 1, pp. 201-204.
16. *Maksimov M.N., Merezhin N.I., Fedosov V.P., Labyntsev A.V., Maksimov A.A.* Ekvivalentnaya skhema sshivayushchego chetyrekhpol'yusnika [Equivalent scheme of a crosslinking four-pole], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2016, Vol. 61, No. 2, pp. 162-169. ISSN 1064 2269. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25069547>.
17. *Mikhail Maksimov, Llyashev Vladimir, Merezhin Nikolay, Sinyutin Sergey.* Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling, *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2017. pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998531.
18. *Popov V.* Fundamentals of Circuit Theory. Moscow: YuRight Publishing, 2013, 285 p.
19. *Vlakh I., Singkhal K.* Mashinnye metody analiza i proektirovaniya elektronnykh skhem [Machine methods of analysis and design of electronic circuits]: trans. from English. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 560 p.
20. The Schur Complement and Its Applications, ed. by Fuzhen Zhang. Series: Numerical Methods and Algorithms. Springer Verlag, 2005, Vol. 4, 295 p.
21. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2021668540 «Programma dlya polunatural'nogo modelirovaniya nelineynoy sistemy s ispol'zovaniem chetyrekhpol'yusnogo predstavleniya fil'tra Puankare-Steklova» [Certificate of state registration of the computer program No. 2021668540 "Program for semi-natural modeling of a non-linear system using a four-pole representation of the Poincare-Steklov filter"].

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Р.Г. Шаповалов.

**Максимов Михаил Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [maksimovm@mail.ru](mailto:maksimovm@mail.ru); г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент.

**Максимова София Михайловна** – Политехнический институт филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет»; e-mail: [sofiamaksimova.2003@mail.ru](mailto:sofiamaksimova.2003@mail.ru); г. Таганрог, Россия; тел.: 88634623414; учебная часть; студентка.

**Maksimov Mikhail Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: [maksimovm@mail.ru](mailto:maksimovm@mail.ru); Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamental of radioengineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Maksimova Sofia Mikhailovna** – Polytechnic Institute branch of the Don State Technical University in Taganrog; e-mail: [sofiamaksimova.2003@mail.ru](mailto:sofiamaksimova.2003@mail.ru); Taganrog, Russia; phone: +78634623414; academic unit; student.

УДК 621.372.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-52-63

**А.М. Пилипенко, А.А. Кольцов**

### **АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТ С РАЗЛИЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НЕЛИНЕЙНОГО ЗВЕНА В КОНТУРЕ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ**

*Рассмотрены синтезаторы частот на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), в которых используются фазовые детекторы (ФД) с различными нелинейными передаточными характеристиками. Целью данной работы является оценка быстродействия синтезаторов частот в зависимости от вида нелинейности ФД и математическое описание нелинейной характеристики ФД, обеспечивающей максимальное быстродействие синтезатора частот. В соответствии с поставленной целью в статье были решены следующие задачи: разработана обобщенная модель синтезатора частот с ФАПЧ; описаны математические модели статических характеристик нелинейного звена системы ФАПЧ при использовании различных видов известных ФД и модифицированного*