

24. Kas'yanov A.O. Twist-polyarizatory na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Twist polarizers based on microstrip diffraction gratings], *Antenny* [Antennas], 2002, Issue 5 (60), pp. 34-39.
25. Kas'yanov A.O., Kas'yanova A.N. Elektrodinamicheskii analiz i razrabotka SAPR-orientirovannykh matematicheskikh modeley pechatnykh antennykh reshetok: monografiya [Electrodynamic analysis and development of CAD-oriented mathematical models of printed antenna arrays: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, 300 p.

Статью рекомендовал к опубликованию: д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Касьянов Александр Олегович – Южный федеральный университет, e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; д.т.н.; профессор.

Kasyanov Alexander Olegovich – Southern Federal University; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of radio engineering and telecommunication systems; dr. of eng. sc.; professor

УДК 621.372.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-34-42

М.Н. Максимов, С.М. Максимова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФИЛЬТРА ПУАНКАРЕ-СТЕКЛОВА ДЛЯ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

В статье показана возможность использования фильтра Пуанкаре-Стеклова для обеспечения устойчивости полунатурного моделирования нелинейных систем. Полунатурное моделирование (НПМ) 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 ИТМ, ТЛМ, ТФА, РСД, ДИМ, ГСД и фильтр Пуанкаре-Стеклова описаны в соответствующих литературных источниках. В статье показано, как исходная нелинейная 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 h . 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 как линейных, так и нелинейных систем.

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

M.N. Maksimov, S.M. Maksimova

**USING THE FOUR-POLE REPRESENTATION
OF THE POINCARÉ-STEKLOV FILTER FOR HARDWARE IN THE LOOP
SIMULATION OF NONLINEAR SYSTEMS**

The article shows the possibility of using the Poincaré-Steklov filter to ensure the stability of hardware in the loop (HIL) simulation of nonlinear systems. 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 method 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 Poincaré-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; Poincaré-Steklov filter.

Введение. За последнее десятилетие у различных моделирующих сред появилось ещё одно измерение – это возможность осуществить полунатурное моделирование (HIL) исследуемой 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 τ .

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 как линейных, так и нелинейных систем.

Постановка задачи. Необходимо используя фильтр Пуанкаре-Стеклова провести моделирование нелинейной системы по частям и продемонстрировать, что при правильном выборе параметров фильтра, он обеспечит устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования такой системы.

Фильтр Пуанкаре-Стеклова, изображённый на рис. 1. Свойства фильтра/четырёхполюсника подробно описаны в [16, 17].

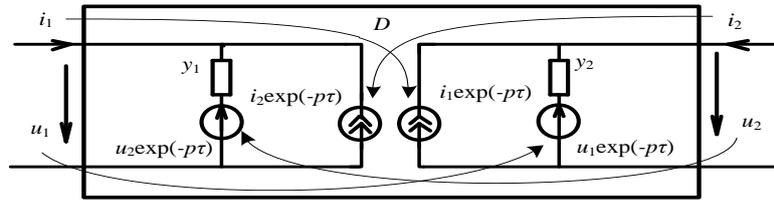


Рис. 1. Четырёхполюсник Пуанкаре-Стеклова

Как видно из рис. 1 фильтр D состоит из управляемых источников тока и напряжения, значения которых равны значениям соответствующих токов и напряжений на входах четырёхполюсника, задержанных на величину τ . Проводимости y_1 и y_2 называются стабилизирующими элементами/параметрами, значения которых существенно влияют на устойчивость процесса моделирования системы по частям.

Y-параметры четырёхполюсника имеют вид:

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

или можно воспользоваться соотношениями между первичными параметрами проходных четырёхполюсников [18] и найти эквивалентные им Z-параметры в виде:

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

где $z_1 = 1/y_1$, $z_2 = 1/y_2$.

Рассмотрим исходную нелинейную систему, изображённую на рис. 2. На вход системы подаётся синусоидальное напряжение, индуктивность $L_1=L_2=1\text{мГн}$, $Y_3 = 100\text{См}$, работу ключей будем моделировать с помощью изменения проводимостей Y_1 и Y_2 ($1e-12\text{См}$ - ключ открыт, $1e+3\text{См}$ - ключ закрыт).

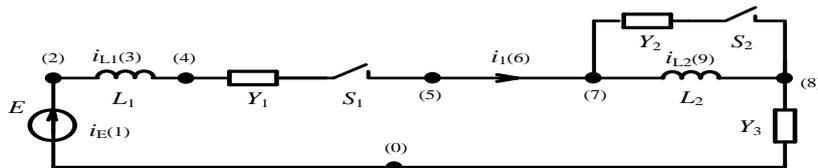


Рис. 2. Исходная система

Интерес к исследованию таких систем возникает при использовании НЛ технологии для моделировании работы трёхфазных инверторов, так как возникают проблемы с обеспечением устойчивости результатов полунатурного моделирования таких систем.

Разбиение исходной системы на части. Разобьём исходную систему на две части как показано на рис. 3. Как описано в [16,17] для обеспечения устойчивости и сходимости моделирования по частям необходимо, чтобы выполнялось условие $y_1 = Y_{\text{вх}}$ и $y_2 = Y_{\text{вых}}$ или $z_1 = Z_{\text{вх}}$ и $z_2 = Z_{\text{вых}}$, где $Y_{\text{вых}}$ и $Y_{\text{вх}}$ или $Z_{\text{вых}}$ и $Z_{\text{вх}}$ это выходная и входная проводимость или сопротивление первой и второй части исходной системы.

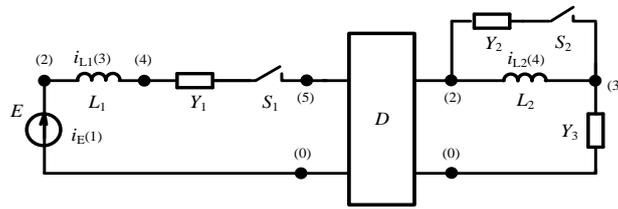


Рис. 3. Разбитая на части исходная система

Если бы исходная система была линейной, то найти значение $Y_{\text{вых}}$ и $Y_{\text{вх}}$ и соответствующим образом установить значения y_1 и y_2 не было бы трудной задачей. Проблема возникает из-за нелинейности исходной системы. Тем не менее, в статье будет продемонстрировано, что фильтр Пуанкаре-Стеклова обеспечивает устойчивость и сходимость моделирования по частям и нелинейной системы.

Систему уравнений, описывающих поведение системы, можно записать используя преобразование Лапласа в виде $(G+pC)X = W$ или после перехода во временную область как $Gx+Cx' = w$ [19]. Если воспользоваться обратной формулой Эйлера, т.е. методом численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, то систему $Gx+Cx' = w$ можно записать в виде:

$$(C+hG)x_{n+1}=Cx_n+hw_{n+1}, \quad (1)$$

где h – шаг по времени (1мс).

Составим систему уравнений по форме (1) для цепи, изображённой на рис. 2. На этом рисунке в скобках указаны номера строк матриц G и C , которые соответствуют или токам ветвей, или напряжениям в узлах. Сами матрицы будут иметь вид:

$$x_n^t = [i_E, u_2, i_{L1}, u_4, u_5, i_1, u_7, u_8, i_{L2}];$$

$$G = \begin{bmatrix} 0, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 1, & 0, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 1, & 0, & -1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & -1, & Y_1, & -Y_1, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & -Y_1, & Y_1, & 1, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 1, & 0, & -1, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & -1, & Y_2, & -Y_2, & 1 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & -Y_2, Y_2+Y_3, & -1 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 1, & -1, & 0 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & -L_1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & -L_2 \end{bmatrix};$$

Получим аналогичный результат для системы разбитой на части (см. рис. 3). Матрицы двух фрагментов системы будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 x1_h^T &= [i_E, u_2, i_{L1}, u_4, u_5, i_{z1}] \\
 G1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & Y_1 & Y_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Y_1 & Y_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & z_1 \end{bmatrix}; \\
 C1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\
 x2_h^T &= [i_{z2}, u_3, u_4, i_{L2}]; \\
 G2 &= \begin{bmatrix} z_2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & Y_2 & -Y_2 & 1 \\ 0 & -Y_2 & Y_2+Y_3 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}; \\
 C2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L2 \end{bmatrix};
 \end{aligned}$$

Найдём дополнение Шура [20] для матрицы $Sys1 = C1+h*G1$ относительно коэффициента $Sys1[6][6]$, т.е. $Z_{вых}$, и дополнение Шура для матрицы $Sys2 = C2+h*G2$ относительно коэффициента $Sys2[1][1]$, т.е. $Z_{вх}$, при условии, что ключи замкнуты ($Y_1 = Y_2 = 1e+3$ См и $z_1 = z_2 = 0$). Далее скорректируем $z_1 = Z_{вх}$ и $z_2 = Z_{вых}$ и подставим их новые значения в матрицы $Sys1$ и $Sys2$.

Как исходная, так и разбитая на части система может при разных положениях ключей S_1 и S_2 находится в четырёх разных состояниях, но дополнение Шура мы вычисляем только для одного состояния (S_1 и S_2 закрыты). Тем не менее, разбитая на части система по-прежнему остаётся устойчивой, что можно продемонстрировать с помощью результатов численного моделирования.

Результаты моделирования системы по частям. Промоделируем 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 с задержкой h . Такой способ численного моделирования разбитой на части системы максимально приближен к процессам, происходящим при полунатурном моделировании систем.

Ниже на рис. 4 представлены графики включения/выключения ключей S_1 и S_2 . Если проводимость ключа равна $1e+3$, то ключ закрыт, если $1e-12$, то ключ открыт.

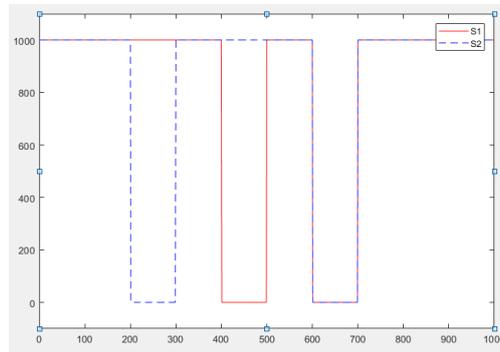


Рис. 4. Графики включения/выключения ключей $S1$ и $S2$

На рис. 5 изображены графики изменения напряжения в пятом узле исходной системы ($U5$) и разбитой на части ($UP5$) при однократном обмене данными между частями системы на каждом шаге моделирования.

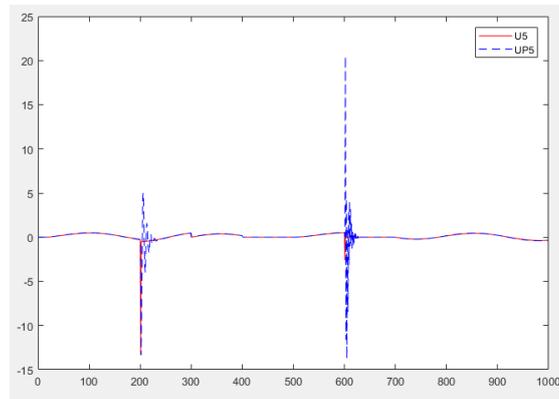


Рис. 5 Графики изменения напряжения в пятом узле исходной системы ($U5$) и разбитой на части ($UP5$)

На рис. 6 показаны графики изменения тока через индуктивность L_2 у исходной системы ($CurL2$) и системы разбитой на части ($CurPL2$) при однократном обмене данными между частями системы на каждом шаге моделирования.

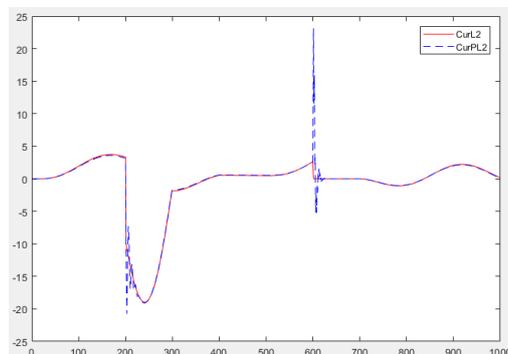


Рис. 6. Графики изменения тока через индуктивность L_2 у исходной системы ($CurL2$) и системы разбитой на части ($CurPL2$)

Как видно из рисунков результаты моделирования системы по частям устойчивы и совпадают с результатами моделирования исходной системы. Если на каждом временном шаге можно было бы выполнять несколько итераций, то результаты совпали бы полностью.

Заключение. В статье была поставлена задача, используя фильтр Пуанкаре-Стеклова, провести моделирование нелинейной системы по частям и продемонстрировать, что при правильном выборе параметров фильтра, он обеспечит устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования такой системы.

На первом этапе используя четырёхполосник Пуанкаре-Стеклова было выполнено разбиение системы на части. Далее, используя обратную формулу Эйлера был осуществлён переход от системы дифференциальных уравнений частей системы к СЛАУ. После чего для проверки полученных результатов были проведены численные эксперименты в среде MATLAB по исследованию устойчивости результатов полунатурного моделирования выбранной системы.

Исследования показали, что при правильном выборе значений стабилизирующих параметров можно добиться устойчивости результатов полунатурного моделирования выбранной нелинейной системы.

Таким образом, поставленная в статье задача была выполнена. Анализируя полученные результаты, можно прийти к выводу, что правильно подобрав значения стабилизирующих параметров фильтра Пуанкаре-Стеклова можно попытаться обеспечить устойчивость результатов полунатурного моделирования даже в случае, если исходная система нелинейная.

Оценка значений стабилизирующих параметров фильтра Пуанкаре-Стеклова при различных состояниях нелинейной системы позволяет сузить диапазон значений, при которых они могут обеспечить устойчивость результатов полунатурного моделирования.

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 // Теле-коммуникации. – 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 швивающего 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., Синьхал 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 четырёхполюсного 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., Ljashev 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], *Material. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Dinamika protsessov v prirode, obschestve 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 chetyrekhpolusnika [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 polunaturalnogo modelirovaniya nelineynoy sistemy s ispol'zovaniem chetyrekhpolusnogo 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; 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; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634623414; учебная часть; студентка.

Maksimov Mikhail Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: 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; Taganrog, Russia; phone: +78634623414; academic unit; student.