Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich. – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail: w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; graduate student.

УДК 621.372.5 DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-43-53

М.Н. Максимов, С.М. Максимова, Р.В. Склифус

О УСТОЙЧИВОСТИ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКА ПУАНКАРЕ-СТЕКЛОВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ПОЛУНАТУРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ СИСТЕМ

Рассматривается устойчивость фильтра Пуанкаре–Стеклова как с точки зрения теории четырёхполюсников, так и с точки зрения итерационных численных методов решения СЛАУ. Полунатурное моделирование (hardware in the loop (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. На первом этапе в статье в обобщённом виде сформулирована задача по анализу устойчивости системы, разбитой на части с помощью фильтра Пуанкаре-Стеклова. Найдены параметры данной системы. На втором этапе проведён анализ устойчивости разбитой на части системы как с точки зрения теории четырёхполюсников, так и численный методов решения СЛАУ. 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 τ 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 позволил сделать вывод, что фильтр Пуанкаре-Стеклова при правильном выборе значений стабилизирующих параметров позволяет обеспечить устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования систем, а также может легко обеспечит устойчивость результатов PHIL моделирования.

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

M.N. Maksimov, S.M. Maksimova, R.V. Sklifus

ON THE STABILITY OF THE FOUR-POLE POINCARE-STEKLOV FOR SOLVING TASKS OF HARDWARE IN THE LOOP MODELING OF SYSTEMS

The article considers the stability of the Poincare–Steklov filter both from the point of view of the theory of four-poles and from the point of view of iterative numerical methods for solving a system of linear algebraic equations. 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 Poincare-Steklov filter are described in the relevant literature sources. At the first stage, the article formulated in a generalized form the problem of analyzing the stability of a system divided into parts using the Poincaré-Steklov filter. The parameters of this system are found. At the second stage, the analysis of the stability of the system divided into parts was carried out both from the point of view of the theory of quadripoles and numerical methods for solving a system of linear algebraic equations. 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 HIL modeling of systems. A comparison of the obtained simulation results of the initial and fragmented system allowed us to conclude that the Poincare-Steklov filter, with the correct choice of values of stabilizing parameters, allows for stability and convergence of the results of HIL modeling of systems, and can also easily ensure the stability of the results of PHIL modeling.*

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

Введение. В статье исследуется устойчивость и сходимость результатов моделирования системы по частям при использовании фильтра Пуанкаре-Стеклова как с точки зрения теории четырёхполюсников, так и с точки зрения численных методов решения СЛАУ.

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, 20, 21], 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 результатов полунатурного моделирования систем.

Постановка задачи. В статье необходимо исследовать устойчивость и сходимость результатов моделирования системы по частям при использовании фильтра Пуанкаре-Стеклова как с точки зрения теории четырёхполюсников, так и с точки зрения численных методов решения СЛАУ.

Ниже на рис. 1 приведена исходная система ***A***+***B***, которая была разбита с помощью Y-формы [20] фильтра Пуанкаре-Стеклова (***D***) на две части ***A***+***D***+***B***.

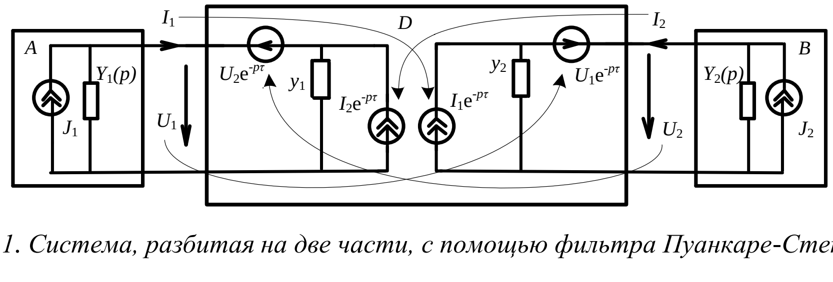

Рис. 1. Система, разбитая на две части, с помощью фильтра Пуанкаре-Стеклова

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

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{y_1+y_2e^{-2p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} & \frac{-(y_1+y_2)e^{-p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} \\ \frac{-(y_1+y_2)e^{-p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} & \frac{y_2+y_1e^{-2p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} \end{bmatrix}.$$

Как видно из рис. 1 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 τ. Проводимости y_1 и y_2 называются стабилизирующими элементами (параметрами). Значения стабилизирующих элементов существенно влияют на устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования.

С помощью *Y*-параметров найдём эквивалентную входную Y_{11} и выходную проводимость Y_{22}, коэффициенты передачи по току G_{12}, G_{21} и напряжению K_{12}, K_{21} сшивающего четырёхполюсника, нагруженного соответственно на $Y_2(p)$ и $Y_1(p)$ Выражения для этих величин приведены ниже:

$$K_{12} = \frac{(y_1+y_2)e^{(-p\tau)}}{Y_2+y_2+(y_1-Y_2)e^{(-2p\tau)}},$$

$$K_{21} = \frac{(y_1+y_2)e^{(-p\tau)}}{Y_1+y_1+(y_2-Y_1)e^{(-2p\tau)}},$$

$$Y_{11} = \frac{--y_1(Y_2+y_2)+(y_1-Y_2)y_2e^{(-2p\tau)}}{Y_2+y_2+(y_1-Y_2)e^{(-2p\tau)}},$$

$$Y_{22} = \frac{--y_2(Y_1+y_1)+(y_2-Y_1)y_2e^{(-2p\tau)}}{Y_1+y_1+(y_2-Y_1)e^{(-2p\tau)}},$$

$$G_{12} = \frac{Y_2(y_1+y_2)e^{(-p\tau)}}{-y_1(Y_2+y_2)+(y_1-Y_2)y_2e^{(-2p\tau)}},$$

$$G_{21} = \frac{Y_1(y_2+y_1)e^{(-p\tau)}}{-y_2(Y_1+y_1)+(y_2-Y_1)y_2e^{(-2p\tau)}}.$$

Если подставить в выражения $K_{12}(p)$, $G_{12}(p)$, $Y_{11}(p)$ значения $y_1 = Y_2(p)$, то они преобразуются к виду:

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

Если подставить в выражения $K_{21}(p)$, $G_{21}(p)$, $Y_{22}(p)$ значения $y_2 = Y_1(p)$, то они преобразуются к виду:

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

Анализируя выражения, приведенные выше, можно прийти к следующим выводам. Если параметр $y_1 = Y_2$, то напряжения и токи на входе и выходе четырёхполюсника совпадают с учётом задержки на один шаг, т.е. $U_2(t)=U_1(t - \tau)$ и $I_2(t)=I_1(t - \tau)$, а эквивалентная входная проводимость обобщённой схемы сшивания будет равна проводимости нагрузки Y_2.

То же самое происходит, если выбрать параметр $y_2 = Y_1$, напряжения и токи на входе и выходе четырёхполюсника совпадают с учётом задержки на один шаг, т.е. $U_1(t)=U_2(t - \tau)$ и $I_1(t)= -I_2(t - \tau)$, а выходная проводимость схемы сшивания будет равна Y_1.

Отсюда можно сделать вывод, что в режиме $y_1=Y_2$, $y_2=Y_1$ четырёхполюсник *D* является *идеальной линией задержки*.

Анализ устойчивости разбитой на части системы. Проведём анализ устойчивости системы изображённой на рис. 1. Для этого найдём полюса коэффициентов передачи по току, выразив передаточные функции следующим образом:

$$G21_n = Y_{11}/(Y_{11} + Y_1), \qquad G12_n = Y_{22}/(Y_{22} + Y_2).$$

где $G21_n, G12_n$ - коэффициенты передачи по току; Y_{11} и Y_{22} - полученные ранее выражения для входной и выходной проводимости соответственно.

Найдём полюсы передаточных функций $G21_n, G12_n$. Они могут быть записаны в виде:

$$\frac{-\ln\left(\frac{(Y_2+y_2)(Y_1+y_1)}{(y_2-Y_1)(y_1-Y_2)}\right)}{2\tau}, -\frac{\ln\left(\frac{(Y_2+y_2)(Y_1+y_1)}{(y_2-Y_1)(y_1-Y_2)}\right)}{2\tau}.$$

Как известно, система устойчива, если полюсы передаточной функции лежат в левой полуплоскости, а это будет выполнено, если будет выполняться условие:

$$\left|\frac{(Y_2-y_1)(Y_1-y_2)}{(Y_1+y_1)(Y_2+y_2)}\right| \prec 1. \tag{1}$$

Исследуем устойчивость результатов моделирования системы по частям при использовании фильтра Пуанкаре-Стеклова с точки зрения итерационных численных методов решения СЛАУ.

При моделировании систем, поведение которой описывается дифференциальными уравнениями, используются методы численного интегрирования [18]. Выбирается шаг моделирования h, реактивные элементы цепи преобразуются к активным элементам и зависимым источникам кода или напряжения. В результате решение системы дифференциальных уравнений, описывающих поведение системы, сводится к решению СЛАУ.

На рис. 2 показана схема обмена данными между частями ***A***, ***B*** системы через фильтр Пуанкаре-Стеклова ***D***, после того как к частям системы был применён метод численного интегрирования, т.е. после того как она была преобразована в СЛАУ. На рис. 2 индекс *t* показывает изменение времени моделирования на величину h, а индекс *k* количество итераций на каждом временном шаге.

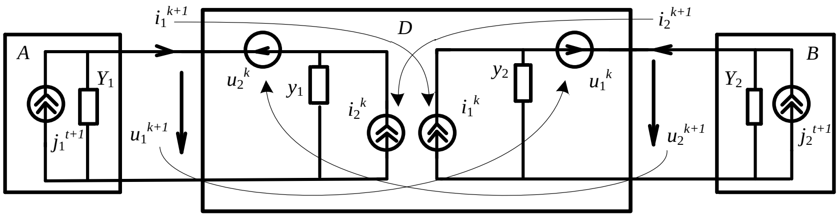

Рис. 2. Схема обмена данными между частями системы ***A***+***B***

Как видно из рисунка, части системы ***A*** и ***B*** решаются параллельно друг другу и обмениваются друг с другом результатами на каждом временном шаге (или каждой итерации), что соответствует итерационному методу решения СЛАУ методом Гаусса-Якоби.

Составим уравнение цепи по методу узловых потенциалов:

$$\begin{pmatrix} Y_1 + y_1 & 0 \\ 0 & Y_2 + y_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_1^{k+1} \\ u_2^{k+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & Y_2 - y_1 \\ Y_1 - y_2 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_1^k \\ u_2^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j_1{}^{t+1} + j_2{}^t \\ j_2{}^{t+1} + j_1{}^t \end{pmatrix},$$

или

$$\begin{pmatrix} u_1^{k+1} \\ u_2^{k+1} \end{pmatrix} = W \begin{pmatrix} u_1^{k} \\ u_2^{k} \end{pmatrix} + \Big(1/(Y| \quad |1+y_1)\, 0 \; 1/(Y_2+y_2) \Big| \quad \Big) \begin{pmatrix} {j_1}^{t+1} + {j_2}^{t} \\ {j_2}^{t+1} + {j_1}^{t} \end{pmatrix},$$

где W – матрица перехода

$$W = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(y_1-Y_2)}{(y_1+Y_2)} \\ \frac{(y_2-Y_1)}{(y_2+Y_1)} & 0 \end{bmatrix}.$$

Собственные значения матрицы перехода W описываются выражением

$$\lambda_{1,2} = \pm\sqrt{\frac{(y_2-Y_1)(y_1-Y_2)}{(Y_1+y_1)(Y_2+y_2)}}. \qquad (2)$$

Как видно из (2), собственные значения матрицы W есть пара реальных или мнимых чисел. Как известно, для того чтобы решение было устойчиво необходимо, чтобы выполнялось условие $|\lambda_{1,2}| < 1$.

Сравнивая полученное выражение с выражениями и результатами, полученными в (1) видим, что они не противоречат друг другу. Поэтому требование о том, что сшивающий четырёхполюсник должен играть роль идеальной линии задержки эквивалентно требованию обращения в ноль всех собственных чисел матрицы перехода W и требованию, чтобы все полюсы передаточной функции были расположены в левой полуплоскости на $-\infty$.

Необходимо отметить, что даже при идеальных условиях, т.е. когда четырёхполюсник играет роль идеальной линии задержки, на каждом временном шаге необходимо выполнить минимум две итерации, чтобы решение разбитой на части системы совпало с решением исходной системы. Но если мы говорим о HIL, то там возможна только одна итерация. Следовательно, решение разбитой на части системы при HIL с использованием фильтра Пуанкаре-Стеклова будет стремиться, но не совпадать с решением исходной системы.

Тем не менее, при применении фильтра Пуанкаре-Стеклова, в случае если часть ***B***, например, является реальным физическим объектом (HIL), то части должны синхронно обмениваться друг с другом данными с частотой $F = 1/\tau$, где $\tau = h$. В свою очередь это означает, что после измерения величин i_2, u_2 и передачи их в часть ***A*,** у части ***A*** есть время τ, чтобы рассчитать новые значения i_1, u_1 и при наличии усилителей в интерфейсе фильтра (PHIL) усилить полученные значения.

Таким образом, задержка на величину τ в обмене данными между частями системы, является необходимым условием для устойчивости процесса моделирования (HIL и PHIL) при использовании фильтра Пуанкаре-Стеклова.

Такой подход существенно отличается от других интерфейсов, построенные на базе методе Гаусса-Зейделя, т.е. методе который предполагает последовательное решение частей системы (пока часть ***A*** находит новые значения, часть ***B*** вынуждена ждать в течении τ_2). К сожалению, поскольку часть ***B*** является реальным физическим объектом (т.е. физические процессы, протекающие в части ***B***, остановить на время τ_2 невозможно), то появление τ_2 приводит к неустойчивости процесса моделирования HIL и тем более PHIL, так как там величина τ_2 может достигать значимых величин. Для таких интерфейсов части системы обычно обмениваются друг с другом данными с частотой $F = 1/T$, где $T = h$, причем при этом стараются обеспечить условие: τ_2 должна быть много меньше T.

Таким образом, система, разбитая на части с помощью фильтра Пуанкаре-Стеклова, устойчива, если стабилизирующие параметры y_1 или y_2 равны Y_2 или Y_1. В свою очередь вычислить значения Y_1 и Y_2 системы можно с помощью дополнений Шура [19].

Пример моделирования системы по частям. Рассмотрим исходную систему, изображённую на рис. 3. На вход системы подаётся напряжение в виде меандра, индуктивность $L_1 = L_2 = 1$мГн, $Y_1 = Y_2 = Y_4 = 1000$См, $Y_3 = 0.5$См, $C_1 = 3e\text{-}3$.

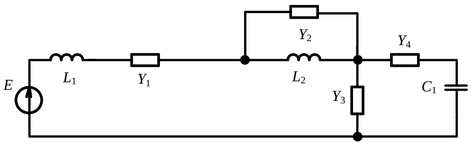

Рис. 3. Исходная система

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

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

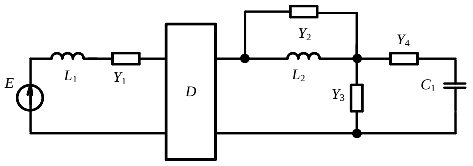

Рис. 4. Разбитая на части система

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. Промоделируем и сопоставим решения исходной системы и разбитой на части при использовании численного метода интегрирования основанного на обратной формуле Эйлера.

Промоделируем с шагом h = 1мс исходную и разбитую на части систему в MATLAB, при этом части системы будут обмениваться данными друг с другом на каждом шаге моделирования только один раз, т.е. задержка $\tau = h = 1$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 напряжение на C_1 у исходной системы и системы разбитой на части.

Ниже на рис. 5 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части. Перед моделированием с помощью дополнения Шура [19] были вычислены значения стабилизирующих элементов y2 = 0.999, y1 = 3.4789.

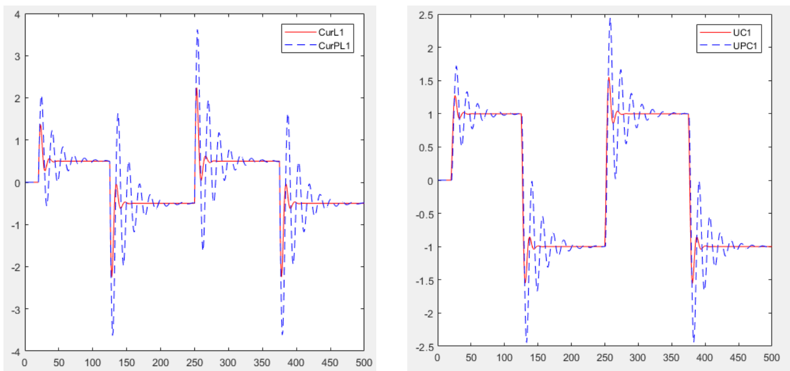

Рис. 5. Графики изменения тока через L_1 и напряжения на C_1 у исходной системы (CurL1, UC1) и разбитой на части (CurPL1, UPC1) при y2 = 0.999, y1 = 3.4789

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, но при этом значения стабилизирующих параметров было взято равным y1 = y2 = 0.999.

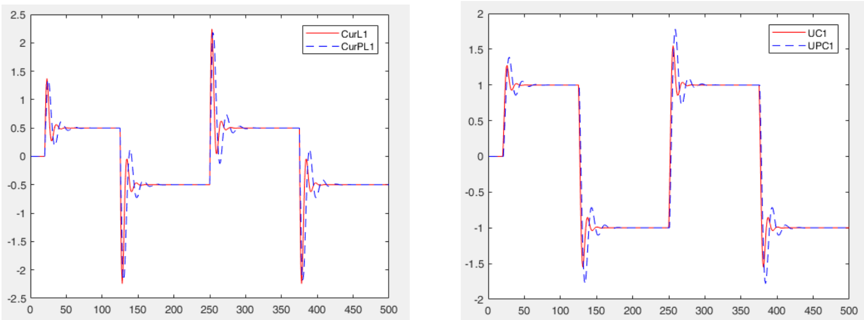

Рис. 6. Графики изменения тока через L_1 и напряжения на C_1 у исходной системы (CurL1, UC1) и разбитой на части (CurPL1, UPC1) при y1 = y2 = 0.999

Как видно из рисунка 6 результаты стали более адекватными, кроме того нет необходимости вычислять дополнение Шура для части ***B***, что в принципе затруднительно, так как предполагается, что она представлена реальным физическим объектом. Напротив, СЛАУ для части ***A*** известна, так что нахождение дополнения Шура не вызывает проблем.

На рис. 7 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 y2 = 0.999, y1 = 3.4789.

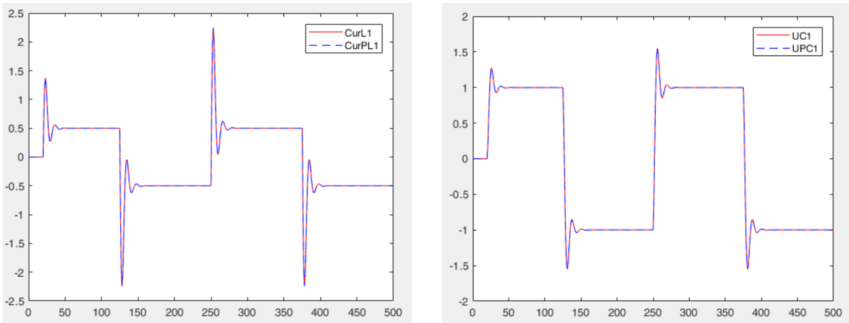

Рис. 7. Графики изменения тока через L_1 и напряжения на C_1 у исходной системы (CurL1, UC1) и разбитой на части (CurPL1, UPC1) при y2 = 0.999, y1 = 3.4789 и выполнении двух итераций на каждом шаге

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:

♦ результаты моделирования HIL системы с использованием фильтра Пуанкаре-Стеклова в принципе будут стремиться, но не смогут точно совпасть с результатами моделирования исходной системы (см. рис 5 и 6);

♦ в статье в численных экспериментах использован «экстремальный» вариант воздействия на систему (меандр), при более «гладком» воздействии результаты HIL моделирования и моделирования исходно системы будут совпадать с достаточной для практики точностью;

♦ фильтра Пуанкаре-Стеклова, по сравнению с другими интерфейсами, позволяет значительно увеличить частоту ***F*** обмена данными между частями HIL системы и легко обеспечит устойчивость результатов PHIL моделирования;

♦ численные эксперименты показывают, что значение стабилизирующих параметров y1, y2 лучше выбрать равным дополнению Шура, полученной для части ***A*** (тем более, что вычислить дополнение Шура для части ***B***, представленной реальным физическим объектом, может потребовать дополнительных усилий).

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

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

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 // Int. Conf. IT-2002. – Part#3. – Taganrog: TSURE, 2002. – P. 35-37.
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. 7 с.
10. *Максимов М.Н.* Распределенное моделирование системы разбитой на три части // Матер. межд. научн. конф. «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: Издательский 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., 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.
17. *Mikhail Maksimov, Vladimir Llyashev, Nikolay Merezhin, Sergey Sinyutin*. Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Year: 2017. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998531.
18. *Влах И., Сингхал К.* Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
19. The Schur Complement and Its Applications, edited by Fuzhen Zhang, Springer Ver- lag, Series: Numerical Methods and Algorithms. – 2005. – Vol. 4. – 295 p.
20. *Максимов М.Н., Максимова С.М.* Применение четырёхполюсника Пуанкаре-Стеклова для построения интерфейса при полунатурном моделировании систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6. – С. 43-52.
21. *Максимов М.Н., Максимова С.М.* Использование четырёхполюсного представления фильтра Пуанкаре-Стеклова для полунатурном моделировании нелинейных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. № 6. – С. 34-42.

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 raspredelennogo modelirovaniya elektricheskikh tsepey v lokal'nykh vychislitel'nykh setyakh [Implementation of distributed simulation of electrical circuits in local area networks], *Tele-kommunikatsii* [Tele-communications], 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. 35-37.
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. 7 p.

10. *Maksimov M.N.* Raspredelennoe modelirovanie sistemy razbitoy na tri chasti [Distributed modeling of a system divided into three parts], *Mater. mezhd. nauchn. konf. «Sistemnyy podkhod v naukakh 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 modeling systems in parts], *Parallel'nye vychisli-tel'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: Izdatel'skiy 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 chetyrekhpolyusnika [Equivalent scheme of a crosslinking four-pole], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 2016, Vol. 61, No. 2, pp. 162-169.
17. *Mikhail Maksimov, Vladimir Llyashev, Nikolay Merezhin, Sergey Sinyutin*. Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling, *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Year: 2017,* pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998531.
18. *Vlakh I., Singkhal K.* Mashinnye metody analiza i proektirovaniya elektronnykh skhem [Machine methods of analysis and design of electronic circuits]: trans. from engl. Moscow.: Radio i svyaz', 1988, 560 p.
19. The Schur Complement and Its Applications, edited by Fuzhen Zhang, Springer Ver- lag, Series: Numerical Methods and Algorithms, 2005, Vol. 4, 295 p.
20. *Maksimov M.N., Maksimova S.M.* Primenenie chetyrekhpolyusnika Puankare-Steklova dlya postroeniya interfeysa pri polunaturnom modelirovanii sistem [Application of the four-pole Poincare-Steklov for interface construction in semi-natural system modeling], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 6, pp. 43-52.
21. *Maksimov M.N., Maksimova S.M.* Ispol'zovanie chetyrekhpolyusnogo predstavleniya fil'tra Puankare-Steklova dlya polunaturnom modelirovanii nelineynykh sistem [Using the four-pole representation of the Poincare-Steklov filter for semi-natural modeling of nonlinear systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 6, pp. 34-42.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

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

Склифус Рада Викторовна – e-mail: sklifuss@mail.ru; тел.: 88634371632; кафедра систем автоматического управления; студентка.

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.

Sklifus Rada Viktorovna – e-mail: sklifuss@mail.ru; phone: +78634371632; the department of automatic control systems; student.

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.

УДК 519.816:510.644.4 DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-53-60

В.И. Данильченко, Е.В. Данильченко, В.М. Курейчик

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЧЕТКИХ УСЛОВИЙ И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ*

Количественная оценка в коллективном поведении и принятии решений в нечетких условиях имеет решающее значение для обеспечения здоровья и безопасности населения. Задача моделирования и прогнозирование поведения в нечетких условиях, как известно, имеет повышенную сложность за счет большого количества факторов, из которых формируется NP-полная многокритериальная задача. Существует сложность в определении количественной оценки влияния нечетких факторов с помощью математической модели. В этой связи в работе предлагается модель принятия решений человеком для описания эмпирического поведения субъектов в эксперименте, имитирующем сценарий чрезвычайной ситуации. Разработанная нечеткая модель объединяет нечеткую логику в обычную модель социального поведения. В отличие от существующих моделей и приложений, такой подход использует нечеткие множества и функции принадлежности для описания процесса эвакуации в условиях чрезвычайной ситуации. Цель данной работы заключается в определении нечетких правил и анализ существующих решений. Научная новизна заключается в формировании набора факторов, которые формируют нечеткие правила принятия динамических решений. Постановка задачи в данной работе заключается в следующем: сформировать набор факторов, влияющие на поведение пешеходов, которые моделируются как нечеткие входные данные. Практическая ценность работы заключается в создании нового набора нечетких правил, позволяющий использовать их в алгоритме эвакуации для эффективного решения поставленной задачи. Принципиальное отличие от известных подходов в применении нового набора нечетких правил, который содержит факторы: «восприятия», «намерение», «отношение». Для реализации предложенной модели, процесса социального поведения при эвакуации, определены независимые переменные. Эти переменные включают измерения, связанные с социальными факторами, другими словами, поведением отдельных субъектов и отдельных малых групп, которые имеют основополагающее значение на ранней стадии эвакуации.

Эвакуация; человеческий фактор; управление рисками; нечеткие условия; многокритериальное принятие решений; интуитивистское нечеткое множество; групповое принятие решений.

V.I. Danilchenko, Y.V. Danilchenko, V.M. Kureichik

DEFINITION OF FUZZY CONDITIONS AND ANALYSIS OF EXISTING SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF EVACUATION IN EMERGENCY SITUATIONS

Quantification in collective behavior and decision-making in fuzzy conditions is crucial to ensure the health and safety of the population. The task of modeling and predicting behavior in fuzzy conditions, as is known, has increased complexity due to a large number of factors from which an NP-complete multi-criteria problem is formed. There is a difficulty in quantifying the

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10121, https://rscf.ru/project/22-71-10121/ в Южном федеральном университете.