

Полунатурное моделирование многофункциональных модульных систем. Условия выбора модели

А.В. Скляр

Южный федеральный университет, г. Таганрог

Аннотация: В статье рассмотрены возможности и выделены элементы для полунатурного моделирования многофункциональных модульных систем (МФМС). С этой целью были проведены математические исследования такого рода систем, выделены задачи их основных элементов и поставлена основная задача для создания универсальной модульной модели. Определена структура энергетической МФМС и её задачи с позиции теории графов. Представлен анализ существующих методов полунатурного (ПНЛ) моделирования, а также выделена структура моделируемого фрагмента системы на стыке двух модулей с использованием метода «сшивания» схемы. В итоге были сформированы выводы о возможности применения полунатурного моделирования в МФМС.

Ключевые слова: полунатурное моделирование, модульные системы, макрозадача, моделирование с оборудованием в цепи обратной связи, аналого-цифровая система, численная часть, аналоговая часть, метод Гаусса-Зейделя, метод Якоби.

Теме многофункциональных модульных систем (далее по тексту – МФМС, система) посвящен цикл статей автора как об основных положениях [1, 2], принципах их создания [3] и развития [4], так и о частных, практических реализациях в различных областях радиоэлектроники. При этом рассматривались как общие, так и частные модели электронных МФМС. А вот проблеме полунатурного моделирования (далее по тексту – ПНМ) подобного класса систем не было посвящено ни одной публикации, несмотря на то, что известно множество методов ПНМ радиоэлектронных систем: TLM, TFA, DIM, ITM, PCD и др. широко освещенных в научных трудах зарубежных [5, 6] и отечественных [7] ученых, в том числе и в совместных работах [8, 9] автора. А сам принцип ПНМ широко используется, например, в программно технических комплексах [10].

Исправить ситуацию поможет цикл статей посвященных ПНМ многофункциональных (в общем случае) и вдобавок модульных (в частности) энергетических систем, и данная статья начинает этот цикл.

Прежде всего, следует определить основные параметры электронной МФМС с целью выявления её элементов пригодных для ПНМ. Для этого необходимо представить МФМС в виде канонической формы математической линейной модели [11], приведённой на рис. 1:

$$\sum_{i=1}^n y_i(t) = \sum_{i=1}^g G_i f_i(t) + \sum_{i=1}^d D_i u_i(t) + \sum_{i=1}^h H_i z_i(t), \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i(t) = \sum_{i=1}^g G_i f_i(t) + \sum_{i=1}^d D_i u_i(t) + \sum_{i=1}^h H_i z_i(t)$$

где: f_i – возмущающие входы системы; u_i – управляющие входы системы; z_i – внутренние переменные системы; y_i – выходы системы; t – время; D_i , G_i , H_i – матрицы параметров.

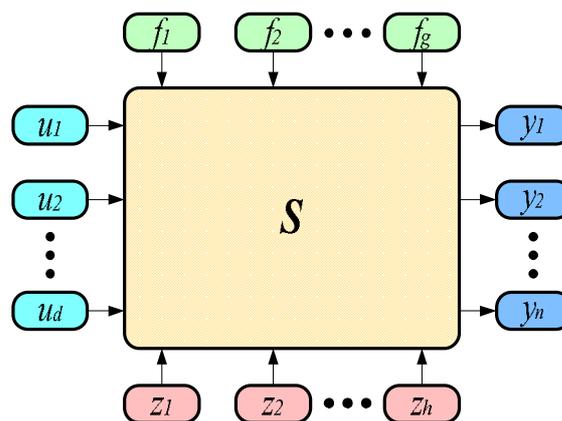


Рис. 1. – Математическая модель МФМС канонической формы

Модель канонической формы [11] в соответствии с формулой (1) может описывать системы с произвольным количеством элементов возмущающих f и управляющих u входов, внутренних переменных z и выходов y , что вполне соответствует принципам многофункциональности системы [2, 4].

Модули возмущающих входов, как несущие основную функциональную нагрузку системы и определяющие её назначение [2, 3], впредь будут называться функциональными модулями – m_f . Эти модули образуют собой множество функциональных модулей – F , и для любого элемента m_f множества F справедливо выражение:

$$m_f \in F, \quad (2)$$

Численный закон образования [2, 3] порядковых номеров функциональных модулей – индексов элементов m_f во множестве F представляет собой натуральный ряд, который обязательно конечен в силу ограниченного ресурса самой системы [2]. Следует считать этот ряд ограниченным сверху числом g_{max} как некоторой конечной величиной определенной свойствами системы.

Минимальное значение числа g_{min} выбирается из следующих условий. Множество F не может:

– быть пустым, т.е. не имеющим вообще функциональных модулей [2, 3];

– иметь только один функциональный модуль, иначе это противоречило бы принципу многофункциональности [2, 4] системы.

Тогда: $g_{min} \geq 2$ и множество F можно представить как:

$$F = \{m_{f1}, m_{f2}, \dots, m_{fg}\} = \{m_f \mid 2 \leq m_f \leq g_{max}\}. \quad (3)$$

Индекс (например – f для модуля m_f) здесь и в последующих обозначениях, относящихся к МФМС, будет означать принадлежность модулей, задач и правил к определённому типу (множеству).

Множество F функциональных модулей m_f строится в соответствии с макрозадачей МФМС [2, 3], и, следовательно, является её отображением. Макрозадача функциональных модулей в МФМС – M_f содержит в себе множество элементарных задач – E_f , т.е.:

$$E_f \in M_f, \quad (4)$$

Отображение макрозадачи M_f функциональной части модульной системы F обязательно осуществляется по определённому правилу R_f :

$$R_f : M_f \rightarrow F. \quad (5)$$

В МФМС для функциональных модулей правило R_f представляет собой множество правил r_f , создающих образы m_f из элементарных задач E_f :

$$r_f(E_f) = m_f. \quad (6)$$

Следовательно, в МФМС функциональный модуль m_f является образом его элементарной задачи E_f , выполненным по правилу r_f . Данный вывод является основным свойством в выявлении возможности замены функциональных модулей на эквивалентный программный продукт при ПНМ МФМС. То обстоятельство, что любой функциональный модуль имеет собственную элементарную задачу, позволяет использовать вместо одного, нескольких или всех функциональных модулей в системе их программные образы, решающие соответствующие им элементарные задачи.

Формулы (2) ... (6) учитывают свойства только функциональных модулей, а полное понимание макрозадачи в МФМС будет расширено добавлением дополнительных элементов участвующих в её решении. При этом следует выделить основной набор устройств жизнеспособной электронной энергетической системы. С учетом рис. 1 основной состав управляемых МФМС, определенный условиями их создания [3], представлен на рис. 2.



Рис. 2. – Основной состав энергетической МФМС

Анализируя вышеприведённые рассуждения можно с уверенностью сказать, что они справедливы для модулей ядра m_c , управления m_u и выхода m_y системы, за одним исключением – их минимальное количество может быть равно единице, т.е.: $h_{min} = d_{min} = n_{min} = 1$. Эти модули в дополнение к множеству F (см. формулу (2)) образуют соответственно аналогичные множества модулей ядра – C , управления – U и выходов – Y системы:

$$m_c \in C; m_u \in U; m_y \in Y, \quad (7)$$

а с учетом условий, в дополнение к формуле (3):

$$\begin{aligned} C &= \{m_{c1}, m_{c2}, \dots, m_{ch}\} = \{m_c \mid 2 \leq m_c \leq h_{\max}\}, \\ U &= \{m_{u1}, m_{u2}, \dots, m_{ud}\} = \{m_u \mid 2 \leq m_u \leq d_{\max}\}, \\ Y &= \{m_{y1}, m_{y2}, \dots, m_{yn}\} = \{m_y \mid 2 \leq m_y \leq n_{\max}\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Также как и для функциональных модулей (см. формулу (6)), каждый из модулей создан для решения своей элементарной задачи, соответственно E_c , E_u и E_y , и является её отображением по определённому для каждой из них правилу r :

$$r_c(E_c) = m_c; r_u(E_u) = m_u; r_y(E_y) = m_y. \quad (9)$$

Элементарные задачи, в свою очередь, также как для M_f в формуле (4), образуют соответствующие множества или макрозадачи, M_c , M_u и M_y :

$$E_c \in M_c; E_u \in M_u; E_y \in M_y; \quad (10)$$

Тогда макрозадача МФМС в общем случае представляет собой ориентированный граф M_s , состоящий из четырех вершин M_f , M_c , M_u и M_y , связанных дугами, указывающими маршрут (см. рис. 3 а)):

$$M_s = (M_f, M_c, M_u, M_y). \quad (11)$$

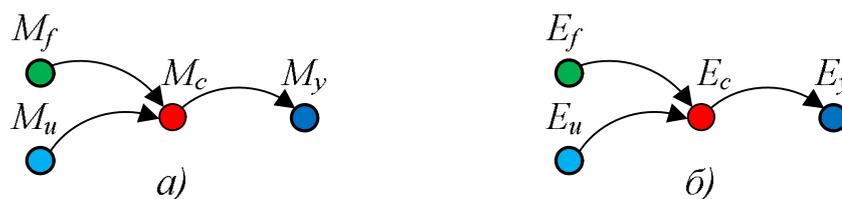


Рис. 3. – Примеры графов задач МФМС: а) общий граф выполнения макрозадачи МФМС; б) граф решения обособленной единичной элементарной задачи системы

Таким образом, любой из модулей энергетической МФМС, описываемый формулами (2), (3) и (7), (8), имеет собственную элементарную задачу (6) и (9) как обособленную (см. рис. 3 б)) часть (10) макрозадачи всей системы (11), и может быть подвергнут ПНМ.

Предназначение ПНМ состоит в том, что компонент системы, для которого нет возможности установить математическую модель, представляется в аналоговом виде (натурные элементы или реальный физический объект), а та часть модулей системы, для которых известны математические описания принципов их работы, представляются в численном (цифровом) виде [7]. На каждом временном шаге организован обмен данными между частями системы в реальном масштабе времени. В зарубежной литературе это направление исследований имеет термин *power hardware-in-the-loop simulation* (моделирование с оборудованием в цепи обратной связи) или PHIL моделирование [10]. При таком моделировании изучается поведение всей «аналого-цифровой» системы в целом, и на основе такого «исследования» можно ответить на вопросы: «Стоит ли собирать полностью в «железе» проектируемую систему? На что нужно обратить внимание при сборке? Какие варианты исполнения системы [2] можно применить при сборке?»

Главное предназначение метода – исследование поведения модулей проектируемой системы. Поэтому, если собрать конечную (т.е. не требующую доработок в плане уменьшения «численной» части и наращивания аналоговой части) систему, то это не будет являться ПНМ. Ведь в этом случае не исследуется поведение как модулей, так и самой системы, которая когда-то в «скором будущем» будет полностью собрана в натуральном виде, здесь просто осуществляется работа с уже готовой давно разработанной системой, которая просто разбита на аналоговую и цифровую части (т.е. работа модели с конечным продуктом). Поэтому следует отличать ПНМ от «готовой» аналого-цифровой системы.

Как уже указывалось, существует множество методов ПНМ радиоэлектронных систем: TLM, TFA, DIM, ITM, PCD и др. [6]. К

сожалению, многие из них имеют недостатки, которые выражаются в следующем.

К примеру, во многих описанных методах части моделируемой системы могут быть соединены дополнительным (например, реактивным) элементом, а на практике это не всегда так. Сюда можно отнести TLM [8].

Большие задержки по времени в моделируемой системе, обусловленные тем, что обмен данными между частями системы происходит не параллельно, а последовательно по методу Гаусса-Зейделя, т.е. пока решаются уравнения электрического равновесия для одной части, другая часть находится в «режиме ожидания». Затем данные передаются другой части, и решаются уравнения электрического равновесия для другой части и т.д. [7].

Не так давно учеными была исследована модификация DIM, называемая GSC, в которой обмен данными между частями происходит не последовательно (по методу Гаусса-Зейделя, как в оригинальном DIM), а параллельно (по методу Якоби), что приближает моделируемую систему к реальной (исходной) системе [6, 12]. В указанных статьях упоминался такой термин, как обобщенная схема сшивания (см. рис. 4), поэтому следует пояснить его «назначение».

Как видно из рис. 4, моделируемая система разбивается на составные части. В реальности – это разбиение системы на модули. Таким образом, вместо двух модулей используются три модуля: численный (компьютерный) модуль, аналоговый модуль, и модуль-адаптер (схема сшивания). В свою очередь, модуль-адаптер разбивается на 2 части – на схему замещения части А и схему замещения части В. Модуль-адаптер должен обеспечивать подстройку сопротивлений таким образом, чтобы выполнялось условие согласования частей и тем самым увеличивать быстродействие моделируемой системы.

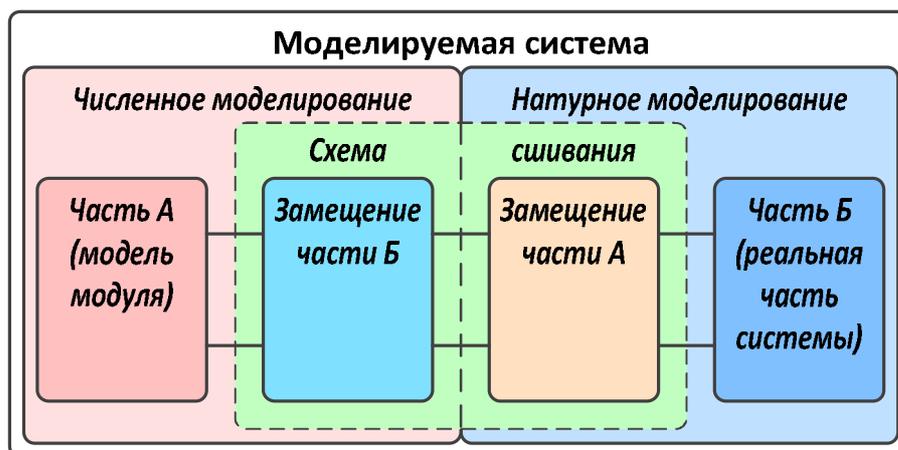


Рис. 4. – Разбиение исходной системы на части

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы.

- 1) Проведение ПНМ в МФМС осуществимо, и его целесообразно выполнять на уровне отдельных модулей, имеющих собственные элементарные задачи.
- 2) Метод ПНМ необходимо выбирать исходя из конкретной элементарной задачи каждого отдельного модуля.
- 3) Для осуществления ПНМ в МФМС необходимо кроме цифровой модели исследуемого модуля введение в схему системы модуля-адаптера.

Литература

1. Скляр А.В., Мережин Н.И. Основные свойства модульных многофункциональных систем // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Ежемесячный научный журнал. 2015. № 4 (13). Ч. 5. С. 41-43.
2. Скляр А.В., Мережин Н.И. Особенности построения модульных многофункциональных систем // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Ежемесячный научный журнал. 2015. № 3 (12). Ч. 5. С. 6-8.
3. Скляр А.В., Мережин Н.И. Условия создания многофункциональных модульных электронных систем // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Ежемесячный научный журнал. 2017. № 1 (34). Ч. 1. С. 55-59.



4. Скляр А.В., Мережин Н.И. Внутрисистемное развитие многофункциональных модульных электронных систем // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Ежемесячный научный журнал. 2015. № 4 (13). Ч. 1. С. 77-80.

5. Avras, A., A.J. Roscoe and G.M. Burt, 2014. Scalable Real-Time Controller Hardware-In-the-Loop Testing for Multiple Interconnected Converters. The UPEC 2014 conference, IEEE Date Views 02.06.2017. URL: [dx.doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620](https://doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620).

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

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

8. Максимов М.Н., Мережин Н.И., Скляр А.В., Мережин Д.Н. Использование оператора Пуанкаре-Стеклова для обеспечения устойчивости PHIL моделирования // Сотрудничество стран БРИКС для устойчивого развития: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых стран БРИКС. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. Т.2. С. 81-82.

9. Скляр А.В., Мережин Н.И. Полунатурное моделирование комплексных систем // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении "КомТех-2017": материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Таганрог: ЮФУ, 2017. С. 21-24.

10. Юренко И.К., Фандеев Е.И., Нефедов В.В. Программно-технические и тренажеро-моделирующие комплексы для разработки, испытаний, управления и обслуживания современных локомотивов. Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1826.

11. Малышенко А.М. Математические основы теории систем: учебник для вузов. Томск: ТПУ, 2008. 364 с.
12. 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.

References

1. Sklyar A.V., Merezhin N.I. Evraziyskiy Soyuz Uchenykh (ESU). Ezhemesyachnyy nauchnyy zhurnal. 2015. № 4 (13). Vol.5. pp. 41-43.
2. Sklyar A.V., Merezhin N.I. Evraziyskiy Soyuz Uchenykh (ESU). Ezhemesyachnyy nauchnyy zhurnal. 2015. № 3 (12). Vol.5. pp. 6-8.
3. Sklyar A.V., Merezhin N.I. Evraziyskiy Soyuz Uchenykh (ESU). Ezhemesyachnyy nauchnyy zhurnal. 2017. № 1 (34). Vol.1. pp. 55-59.
4. Sklyar A.V., Merezhin N.I. Evraziyskiy Soyuz Uchenykh (ESU). Ezhemesyachnyy nauchnyy zhurnal. 2015. № 4 (13). Vol.1. pp. 77-80.
5. Avras, A., A.J. Roscoe and G.M. Burt, 2014. Scalable Real-Time Controller Hardware-In-the-Loop Testing for Multiple Interconnected Converters. The UPEC 2014 conference, IEEE Date Views 02.06.2017. URL: [dx.doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620](https://doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934620).
6. Ren, W., 2007. Accuracy Evaluation of Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Simulation, PhD thesis, Florida State University, Tallahassee, pp: 1-68.
7. Shaykin A.S., Shaykina E.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2248
8. Maksimov M.N., Merezhin N.I., Sklyar A.V., Merezhin D.N. Ispol'zovanie operatora Puankare-Steklova dlya obespecheniya ustoychivosti PHIL modelirovaniya [The using of the Poincaré-Steklov operator to ensure the stability of the PHIL simulation]. Sotrudnichestvo stran BRIKS dlya ustoychivogo razvitiya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii



molodykh uchenykh stran BRIKS. Rostov-na-Donu: YuFU, 2015. Vol.2. pp. 81-82.

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

10. Yurenko I.K., Fandeev E.I., Nefedov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1826

11. Malysenko A.M. Matematicheskie osnovy teorii sistem: uchebnik dlya vuzov [Mathematical foundations of the theory of systems: a textbook for high schools]. Tomsk: TPU, 2008. 364 p.

12. Maksimov M.N., Merezhin N.I., Fedosov V.P., Labyntsev A.V., Maksimov A.A. Radiotekhnika i elektronika. 2016. Vol.61. №2. pp. 162-169.