

УДК 004.942

Т. А. Денисенко¹, А. Г. Нестерюк¹, А. В. Денисенко²

¹Одесский национальный политехнический университет
проспект Шевченко, 1, 65044 Одесса, Украина

²Одесская национальная академия пищевых технологий
ул. Канатная, 112, 65039 Одесса, Украина

Исследование достижимости непрерывной части гибридной системы

Рассмотрены вопросы проведения исследования непрерывной части гибридных систем, представленных языковыми средствами дискретно-непрерывных сетей с использованием подхода уменьшения размерности исследуемой сети.

Ключевые слова: *достижимость, дискретно-непрерывная сеть, редукция, система с управляемой структурой, гибридная система.*

Введение

В настоящее время в нашей стране и за рубежом [1–3] много внимания уделяется разработке и исследованию различных сложных систем автоматического управления с многорежимным характером функционирования, которые представляются как дискретной, так и непрерывной частями, взаимодействующими друг с другом. В образовательной сфере исследования в этом направлении важны для успешного освоения учебного материала технических дисциплин и приобретения навыков практической работы со сложными технологическими объектами, комплексами и системами. Системы данного типа, системы с управляемой структурой (СУС), описываются при помощи языковых средств дискретно-непрерывных (ДН) сетей [3–5]. Одной из задач, без решения которой часто не удастся провести разработку систем автоматического управления, является задача достижимости гибридной системы. Подходы к решению данной задачи предлагались с использованием ДН-сетей, что позволяет свести проверку свойства достижимости СУС к задаче проверки достижимости соответствующей сети [6]. Данный подход требует проведения исследования достижимости непрерывной части ДН-сети как одного из этапов исследования. Необходимо отметить, что проведение данного этапа необходимо повторять для каждой новой структуры, полученной в процессе проверки алгоритма работы исследуемой системы [7]. Таким образом, довольно большой объем вычислений приходится на проверку достижимости непрерывной части. Одной из особенностей ДН-сетей, при описании с их помощью объектов СУС,

© Т. А. Денисенко, А. Г. Нестерюк, А. В. Денисенко

является повышенной размерность сети и, как следствие, описываемых ее матриц. Для уменьшения вычислительных затрат необходимо использовать методы, которые позволяют уменьшить размерность сети. Одним из таких методов является проведение свертки непрерывной части сети по заранее установленным правилам. При этом главным требованием является сохранение свойства достижимости выходных вершин преобразованной непрерывной части ДН-сети из входных вершин.

Целью данной работы является проведение исследований непрерывной части гибридных систем, представленных языковыми средствами ДН-сетей, с использованием подхода уменьшения размерности исследуемой сети.

Способы сокращения размерности ДН-сети

Рассмотрим преобразования, которые можно производить над подсетями непрерывной части, и определим влияние входных сигналов $u_i^c(t)$ на выходные сигналы $x_i^c(t)$, т.е. определим свойство достижимости для данной ДН-сети. Предположим, что в результате декомпозиции возможно формирование ограниченного количества типов подсетей. Для каждой подсети построим матрицу инцидентности A^u , полученную путем замены в матрице инцидентности A_i^c элементов a на 1. По матрице A^u определим путь от позиции истока к позиции стока. Если позиция стока достижима из позиции истока, то производим преобразование подсети. Для данной операции возможно выделение четырех основных типов подсети, наиболее распространенных в ДН-сетях, описывающих СУС [8–10].

Выделим 1 тип подсети (рис. 1,а). Для подсети 1-го типа (последовательного соединения или А-элемента) построим инцидентную матрицу (рис. 1,б).

Анализ матрицы A^u позволяет сделать вывод, что существует путь из позиции стока p_1^c в позицию истока p_3^c , отмеченный пунктирной линией, тогда подсеть может быть заменена элементарной сетью, показанной на рис. 1,а.

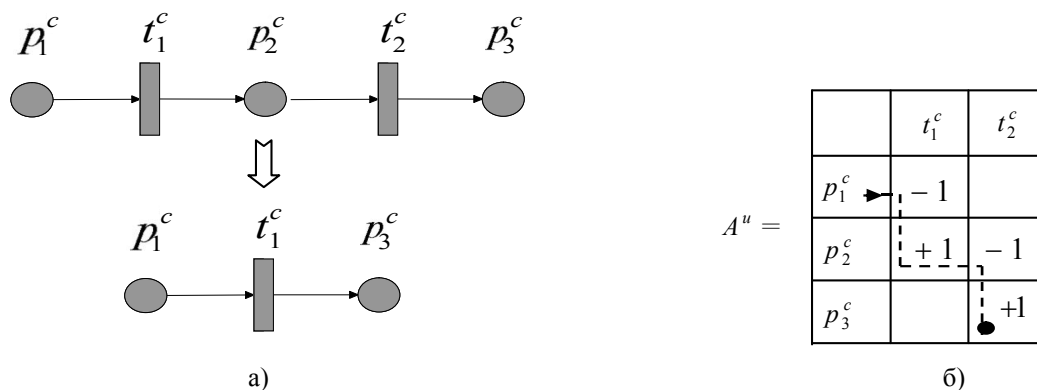


Рис. 1. А-элемент: а) преобразование А-элемента; б) матрица инцидентности

Анализ матрицы A^u позволяет сделать вывод, что существует путь из первой позиции стока в третью позицию истока, отмеченный пунктирной линией. Тогда подсеть может быть заменена элементарной сетью, показанной на рис. 1,а.

Рассмотрим 2-ю подсеть (параллельного соединения, или П-элемента, рис. 2,а) и инцидентную матрицу (рис. 2,б). Проведя аналогичный анализ, отметим, что можно удалить переходы t_1^c , t_2^c и позиции p_2^c и p_3^c , получив, таким образом, элементарную подсеть.

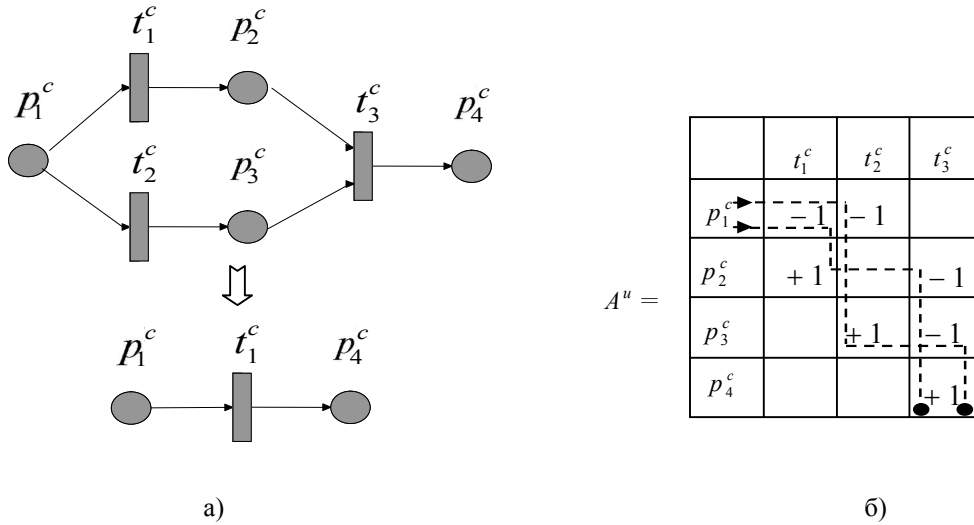


Рис. 2. П-элемент: а) преобразование П-элемента; б) матрица инцидентности

Проведя аналогичный анализ, отметим, что можно удалить первый и второй переходы и вторую и третью позиции, получив, таким образом, элементарную подсеть.

Анализ матрицы инцидентности (рис. 3,б) смешанной подсети, приведенной на рис. 3,а, позволяет сделать возможным замену ее подсетью, представленной позициями p_1^c , p_2^c , p_5^c и переходом t_3^c .

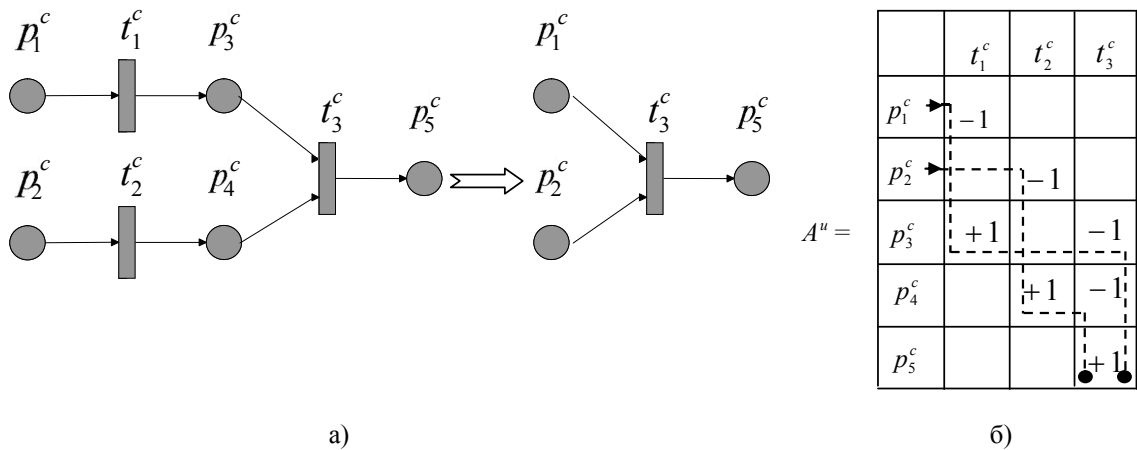


Рис. 3. Смешанный элемент: а) преобразование смешанного элемента; б) матрица инцидентности

Проведя аналогичные преобразования, можно показать, что возможно провести замену элемента с обратной связью, представленного на рис. 4, где показаны преобразования для подсети с обратной связью и ее матрица инцидентности.

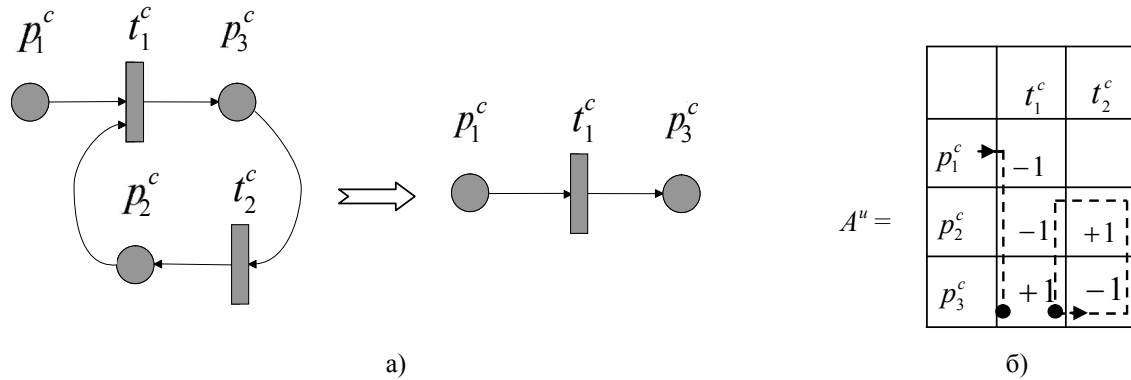


Рис. 4. Элемент с обратной связью: а) преобразование элемента с обратной связью; б) матрица инцидентности

Пример

В качестве примера исследования свойства непрерывной части ДН-сети выбрана установка для выпаривания раствора хлористого натрия (рис. 5).

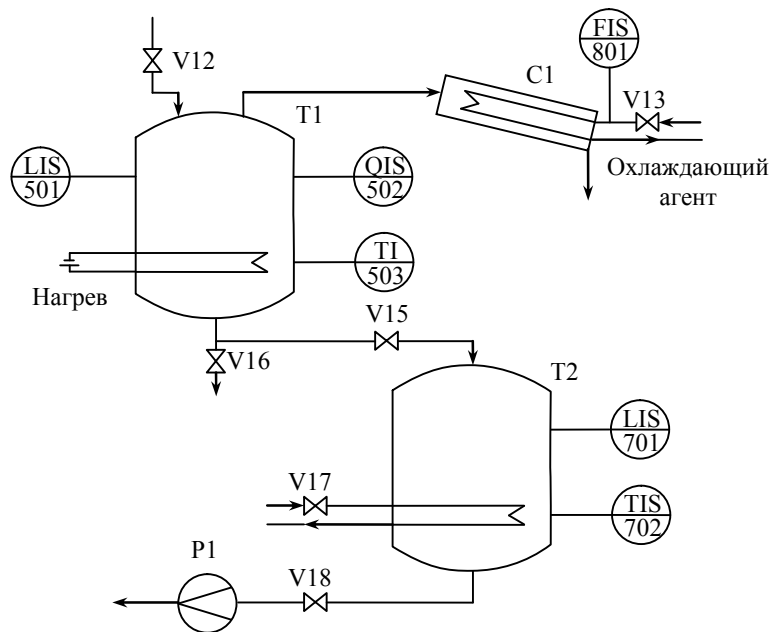


Рис. 5. Упрощенная технологическая схема процесса

Технологический процесс реализуется следующим образом. Заполнение резервуара T1 обеспечивается открытием клапана V12. Информация о достижении заданного уровня регистрируется уровнемером LIS. Для обеспечения необходи-

мого уровня концентрации раствора к резервуару Т1 подводится теплоноситель. Пар охлаждается в конденсаторе С1, к которому подается охлаждающая вода.

Когда необходимая концентрация в резервуаре Т1 достигнута, и резервуар Т2 пуст, сконцентрированный раствор сливается в Т2, где происходит следующий этап обработки. Готовое вещество выкачивается из Т2.

В случае аварии системы охлаждения конденсаторов в Т1 продолжается процесс испарения, и через некоторое время достигается опасно высокое давление в С1, что приводит к разрушению конденсатора. Следовательно, процесс испарения в случае такой аварии должен быть прерван.

Когда необходимая концентрация раствора в резервуаре Т1 достигнута, но его нельзя сливать в емкость Т2, через некоторое время вещество в Т1 преобразуется в гель. Это, в свою очередь, вызывает разрушение испарителя-конденсатора Т1. Следовательно, опасная ситуация создается как при аварии (потеря охлаждающей воды), так и в случае занятости Т2 обработкой предыдущей партии.

Процесс описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), u_d(t)),$$

где t — время (непрерывное); $x = (T, m_1, m_2)$ — вектор состояния; T — температура в емкости Т1; m_1 — общая масса в емкости Т1; m_2 — масса в емкости Т2. $u_d = (Q_h, Y_{V15}, Y_{V18})$ является вектором управления, где Q_h — количество тепловой энергии, поданной в реактор; Y_{V15} — положение клапана V15; Y_{V18} — положение клапана V18. Клапаны V15 и V18 могут занимать положение «открыт» или «закрыт». В системе управления управляющие воздействия $u_d \in U_d$ могут принимать четыре состояния:

$$u_d \in U_d = \{u_d^{(1)}, u_d^{(2)}, u_d^{(3)}, u_d^{(4)}\},$$

$$\text{где } u_d^{(1)} = \begin{pmatrix} 5000 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, u_d^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, u_d^{(3)} = \begin{pmatrix} 5000 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, u_d^{(4)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Математическая модель процесса в развернутом виде может быть представлена системой уравнений, описывающих балансы массы и энергии:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_h - k \left(A_1 + \frac{\pi D m_1}{\rho l A_1} \right) (T - T_e)}{c_{p,L} m_1 - \hat{c}_p m_V - (T \hat{c}_p - \Delta h_{ev}) \frac{dm_V}{dt}},$$

$$\frac{dm_1}{dt} = -Y_{V15} A_R \sqrt{\frac{2 \rho_L m_1 g}{A_1}},$$

$$\frac{dm_2}{dt} = -Y_{V15} A_R \sqrt{\frac{2\rho_L m_1 g}{A_1}} - Y_{V18} A_R \sqrt{\frac{2\rho_L m_2 g}{A_2}},$$

где $\hat{c}_p = c_{p,L} - c_{p,V}$

и

$$m_V = \frac{pM_\omega \left(\frac{m_1(t_0)}{pL} + V_V(t_0) - \frac{m_1}{pL} \right)}{R_m \left(T - \frac{pM_\omega}{R_m pL} \right)},$$

$$\frac{dm_V}{dT} = -\frac{m_V}{T - \frac{pM_\omega}{R_m pL}} + \frac{Tm_V}{T - \frac{pM_\omega}{R_m pL}} \cdot \frac{B_p}{(T + C_p)^2}.$$

Следующие физические величины могут быть использованы:

p — давление насыщения воды, которое моделируется при помощи уравнения Антуана¹:

$$p = e^{A_p} - \frac{B_p}{T + C_p};$$

Δh_{ev} — специфическая энтальпия испарения: $\Delta h_{ev} = b_1 - b_2 T$.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Qh - (4,5 + 0,323 \cdot m_1) \cdot (T - 283)}{422 \cdot m_1 - 233 \cdot m_V - (T \cdot 233 - \Delta h_{ev}) \cdot \frac{dm_V}{dt}},$$

$$\frac{dm_1}{dt} = -Y_{15} \cdot 22 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{6343800 \cdot m_1},$$

$$\frac{dm_2}{dt} = Y_{15} \cdot 22 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{6343800 \cdot m_1} - Y_{18} \cdot 22 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{3171900 \cdot m_2},$$

$$m_V = \frac{P \cdot 0,18 \cdot \left(6,185 \cdot 10^{-4} + 0,02 - \frac{m_1}{9700} \right)}{8,314 \cdot (T - 2,23 \cdot 10^{-6} \cdot P)},$$

$$\frac{dm_V}{dt} = -\frac{m_V}{T - P \cdot 2,23 \cdot 10^{-6}} + \frac{T \cdot m_V}{T - 2,23 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3984,9}{(T - 39,724)^2},$$

$$P = 1,57 \cdot 10^{10} - \frac{3984,9}{T - 39,724}.$$

Приведенные выше уравнения являются операторами непрерывных переходов ДН-сети. Исходя из них, можно сделать вывод, что система является много-

¹ Предложено французским ученым-инженером L.C. Antoine (1825–1897).

мерной, имеет три выходных координаты состояния m_1 , m_2 , T и является нелинейной. Описанный подход исследования непрерывной части ДН-сети был реализован в модуле проверки достижимости сети программной средой моделирования и исследования свойств дискретно-непрерывных сетей DCNET на приведенном выше примере.

Выводы

Результаты проведенных исследований непрерывной части гибридных систем, представленные языковыми средствами дискретно-непрерывных сетей с использованием подхода уменьшения размерности исследуемой сети, нашли применение в учебном процессе с учетом имеющейся материальной базы.

1. Goebel R., Sanfelice R., Teel A. Hybrid Dynamical Systems: Modeling, Stability, and Robustness. Princeton University Press, 2012. 232 p.
2. Bujorianu L.M. Stochastic Reachability Analysis of Hybrid Systems/Communications and Control Engineering. Springer, 2012. 243 p.
3. Згуровский М.З., Денисенко В.А. Дискретно непрерывные системы с управляемой структурой. Теория моделирования, применение. Киев: Наук. думка, 1998. 350 с.
4. Денисенко А.В. Информационная технология анимации сложных технических комплексов на основе дискретно-непрерывных сетей, FLASH-технологии и инструментальных средств DCNET. *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*. 2014. Т. 16. № 3. С. 54–60.
5. Нестерюк А.Г., Гурский А.А., Денисенко А.В. Анализ моделирования химического реактора как логико-динамической системы. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2014. № 38. С. 124–130.
6. Денисенко В.А., Нестерюк А.Г. Задача достижимости гибридной системы. Тр. Одес. политехн. ун-та. Одесса, 2005. Вып. 1(23). С. 67–74.
7. Гурский А.А., Гончаренко А.Е., Денисенко А.В. Генерация сети Петри на базе средств дискретно-непрерывных сетей при формировании алгоритма синтеза координирующей системы управления. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2017. № 26(102). С. 78–87.
8. Гурский А.А., Дубна С.М. Настройка нейронной сети при автоматическом синтезе сетей Петри. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2018. Т. 10. № 1. С. 9–19.
9. Гурский А.А., Денисенко В.А., Гончаренко А.Е. Контур самонастройки нейро-нечеткой системы управления холодильной установкой с центробежным компрессором. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2014. № 4. С. 92–101.

Поступила в редакцию 05.06.2018