УДК.:004.71:519.254:621.31

С.М. Асанова, a_sm07@kstu.kg
*Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова, 720044, **Кыргызстан**, г. Бишкек, пр. Мира, 66.*

РАЗВИТИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

В работе дается определение самоорганизующемуся алгоритму, а также краткое описание расширения сетей Петри – вычислительных сетей Петри, которые являются средством построения таких алгоритмов. Приводится графическое представление и описываются вычислительные возможности сетей Петри. Также дано обоснование необходимости разработки эффективного инструмента для построения самоорганизующихся многокомпонентных (структурно-подобных) вычислительных алгоритмов для решения задач электроэнергетики. Разработка эффективного инструмента, т.е. вычислительных сетей Петри, позволяющих строить такие алгоритмы для анализа топологии, оптимизации структуры, расчета и моделирования динамики в сложных электроэнергетических системах, является весьма актуальной. Эффективность его использования объясняется прежде всего тем, что он позволяет достаточно простыми средствами строить структурно-подобные исследуемым объектам и удобные с позиции реализации на ЭВМ модели динамических систем с параллельно функционирующими и асинхронно взаимодействующими компонентами.

Ключевые слова: сети Петри, самоорганизующийся многокомпонентный вычислительный алгоритм, математическая модель, дискретные и непрерывные системы, электроэнергетические системы.

Введение

Современные технические системы, в частности системы электроэнергетики, относятся к классу сложных систем, которые обладают следующими свойствами: большое количество компонентов и сложные связи между ними; переменная структура системы, т.е. количество компонентов и связи между ними могут меняться во время ее функционирования; компоненты могут быть непрерывными, дискретными или непрерывно-дискретными (гибридными) и могут иметь различную физическую природу; между компонентами могут быть как физические, так и информационные связи, и т.д.

Получить единую математическую модель сложных систем и процессов, учитывающую вышеперечисленные свойства, часто не удается. Если даже удается ее как-то получить, то она, как правило, обладает большой размерностью (вычислительной трудоемкостью), и в ней с трудом угадывается структура исследуемых объектов, что приводит к значительным трудностям при получении правильной интерпретации результатов вычислений.

Одним из мощных средств, применяемых для построения структурно-подобных и удобных с позиций интерпретации и реализации на ЭВМ моделей сложных систем и процессов, является аппарат сетей Петри (СП) [1,2]. Моделирующие возможности СП и эффективность их применения в приложениях объясняется прежде всего тем, что СП – это интеграция графа и дискретной динамической системы, она может служить одновременно и статической, и динамической моделью описываемого ею объекта и является едва ли не самым удобным и многообещающим инструментом, позволяющим достаточно простыми средствами строить структурно подобные и удобные с позиции программирования модели дискретных объектов с параллельно функционирующими и асинхронно взаимодействующими компонентами.

Однако моделирующие возможности этих расширений СП [1,2] все же не позволяют получить эффективные сети Петри, реализующие сложные дискретные и дискретно-непрерывные вычислительные алгоритмы и алгоритмы обработки символьно-цифровой информации, возникающие при решении задач анализа статической топологической структуры, построения математической модели, моделирования и управления сложными распределенными системами, какими являются, например, крупные электроэнергетические системы, системы электроснабжения технологических установок сложных дискретных и дискретно-непрерывных производств, ирригационные и гидроэнергетические системы и т.д.

В связи с вышеуказанным, в работах[3] предложена расширенная сетевая модель – модель вычислительной сети Петри (ВСП), являющаяся дальнейшим развитием и обобщением вышеперечисленных расширений аппарата сетей Петри.

Ниже приводятся некоторые дополнения к ВСП и дается определение самоорганизующимуся алгоритму, т.е. приводится графическое представление и описываются вычислительные возможности ВСП, а также обсуждаются вопросы, связанные с применением ВСП для решения задач электроэнергетики. Отметим, что применение ВСП в приложениях, как станет ясно ниже при ее изложении, существенно расширяет круг решаемых задач моделирования в сравнении с существующими расширениями [1,2].

Также дается определение самоорганизующемуся алгоритму и краткое описание расширения сетей Петри – вычислительных сетей Петри, которые являются средством построения таких алгоритмов.

О п р е д е л е н и е. Алгоритм A, решающий некоторую задачу Z, называется самоорганизующимся, если он обладает следующими свойствами:

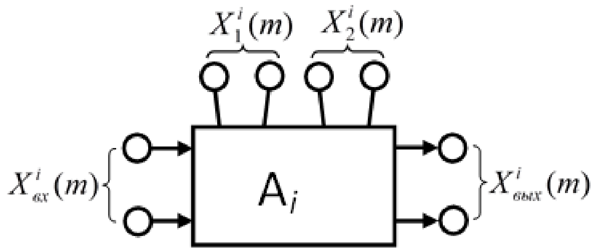


Рисунок 1 – Структура i-й компоненты A_i алгоритма A

1) Алгоритм A состоит из n-компонент $\{A_1, A_2, ..., A_n\}$, информационные выводы которых взаимосвязаны друг с другом через множество позиций X, при этом в тексте алгоритма A его компоненты расположены в произвольном порядке. Множество компонент алгоритма A, взаимосвязанные через множество позиций X, образуют начальную статическую структуру данного алгоритма A. Структура i-й компоненты A_i показана на рис. 1, где прямоугольником обозначен вычислительный модуль алгоритма A_i; $X_{вх}^i \subseteq X$ – множество входных позиций; $X_{вых}^i \subseteq X$ – множество выходных позиций; $X_1^i \subseteq X$ – множество управляющих позиций, и $X_2^i \subseteq X$ – множество информационных позиций.

2) На каждом m-м такте функционирования алгоритма A срабатывают только активные компоненты из множества компонент $\{A_1, A_2, ..., A_n\}$, образуя, таким образом, параллельно-последовательную вычислительную структуру. Активность или пассивность каждого i-го компонента A_i определяется на основе информации о состоянии множества управляющих позиций X_1^i. При срабатывании активного компонента A_i, на основе информации о состоянии множества информационных позиций X_2^i модифицируется состояние множества входных $X_{вх}^i$ и выходных $X_{вых}^i$ позиций.

3) В процессе функционирования многокомпонентного алгоритма A, в зависимости от состояния определенных позиций из множества X, может меняться структура определенных компонент A_i за счет изменения множеств и(или) входных $X_{вх}^i(m) \subseteq X$,

и(или) выходных $X^i_{вых}(m) \subseteq X$, и(или) информационных $X^i_2(m) \subseteq X$ позиций на каждом m-м такте его функционирования (рис.1).

Из-за ограниченности вычислительных возможностей существующего аппарата сетей Петри (СП) и их расширений для решения задач вышеуказанного характера в работах [3] предложено новое расширение СП – вычислительная сеть Петри (ВСП), являющаяся обобщением и дальнейшим развитием существующих СП (алгебраических и самомодифицируемых) и обладающая универсальной вычислительной возможностью для обработки символьно-числовой информации. Определены вычислительные компоненты, язык (коды) их описания и правило их функционирования, позволяющие набору вычислительных компонент, построенных для решения той или иной задачи, структурно и логически самоорганизовываться в процессе их функционирования для получения решения поставленных задач.

Сетевая структура ВСП, отражающая как статическую, так и динамическую структуру исследуемого процесса или системы, формально определяется как набор: $C = ((P, \Lambda, \Psi, T, E), D, \Omega, \Phi, W, \mu, \gamma)$.

В этом наборе (условно-графическое обозначение компонентов ВСП, их теоретико-множественное описание и наименование приведены в таблице 1, а векторная функциональная схема сетевой структуры ВСП показана на рис. 2:

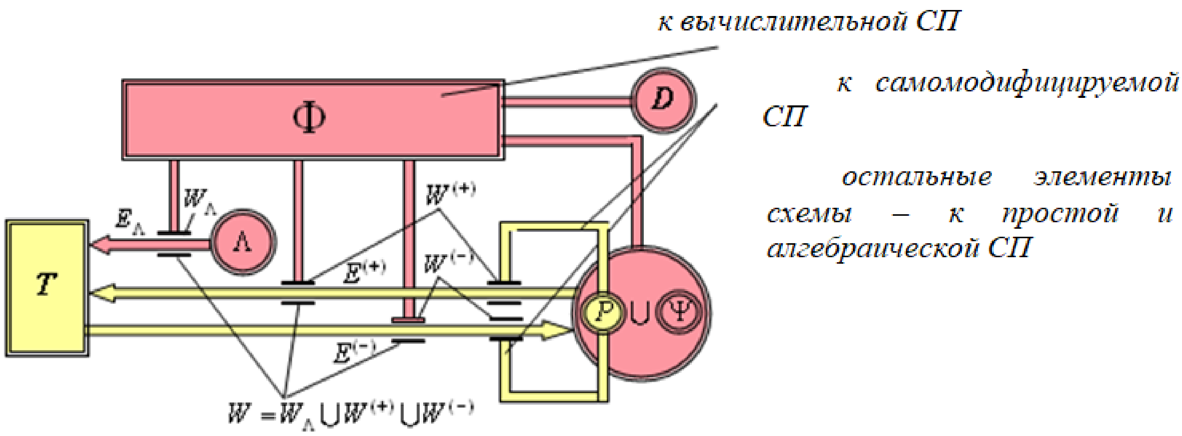


Рисунок 2 – Векторная функциональная схема сетевой структуры ВСП

1) P – множество позиций, предназначенных для моделирования состояния сети (табл. 1, п.1): $P = P_p \cup P_q \cup P_s$, где $P_p = \{p_i \mid i \in I_p\}$ – множество дискретных (целочисленных) позиций p_i; $P_q = \{q_i \mid i \in I_q\}$ – множество непрерывных (вещественных) позиций q_i; $P_s = \{s_i \mid i \in I_s\}$ – множество символьных позиций s_i.

2) Λ – двухэлементное множество позиций логических констант (табл. 1, п.2): $\Lambda = \{\lambda_0, \lambda_1\}$, где $\lambda_0 = 0$ – «ложь»; $\lambda_1 = 1$ – «истина».

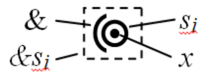
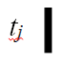
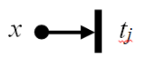
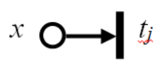
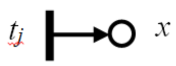
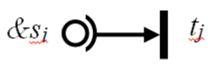
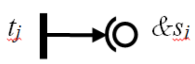
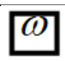
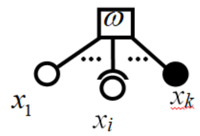
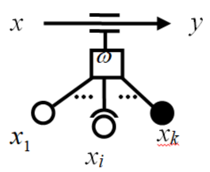
3) Ψ – множество позиций-указателей (табл. 1, п.3): $\Psi = \Psi_p \cup \Psi_q \cup \Psi_s$, где $\Psi_p = \{\& s_i \mid s_i \in S_p \subset P_s\}$, $\Psi_q = \{\& s_i \mid s_i \in S_q \subset P_s\}$, $\Psi_s = \{\& s_i \mid s_i \in S_s \subset P_s\}$ – множества указателей, соответственно, на дискретные $p_i \in P_p$, непрерывные $q_i \in P_q$ и символьные $s_i \in P_s$ позиции; $\& s_i$ – формула указателя, s_i – символьная позиция, моделирующая память указателя, а $\&$ – операция макроподстановки, осуществляющая подстановку содержимого x памяти s_i в качестве позиции x вместо самого указателя $\& s_i$, иначе говоря, указатель $\& s_i$ превращается в позицию с именем x.

4) T – множество переходов, предназначенных для моделирования событий в сети (табл. 1, п. 4): $T = \{t_j \mid j \in I_T\}$, $I_T = \{1, 2, ..., n_T\}$.

5) E – отношение инцидентности позиций, указателей и переходов, т.е. множество дуг сети (табл. 1, п. 5-9): $E = E_\Lambda \cup E^{(+)} \cup E^{(-)}$, $E_\Lambda \subseteq \Lambda \times T$, $E^{(+)} \subseteq (P \cup \Psi) \times T$, $E^{(-)} \subseteq T \times (P \cup \Psi)$.

6) D – множество позиций, предназначенных для хранения предметных констант (табл. 1, п.10): $D = D_p \cup D_q \cup D_s$.

Таблица 1 – Условно-графические обозначения компонентов сетевой структуры ВСП

	Условно-графическое обозначение	Теоретико-множественное описание	Наименование
1		$x \in P = P_p \cup P_q \cup P_s$	Позиция x
2		$x \in \Lambda$	Позиция x-логических констант
3		$\&s_i \in \Psi$, $s_i \in S \subset P_s$, $x \in P$	Указатель $\&s_i$ на позиции $x \in P$
4		$t_j \in T$	Переход (событие)
5		$(x, t_j) \in E_\Lambda \subset E^{(+)}$, где $x \in \Lambda$, $t_j \in T$	Логическая дуга (x, t_j) –входная
6		$(x, t_j) \in E^{(+)}$, где $x \in P$, $t_j \in T$	Входная дуга (x, t_j)
7		$(t_j, x) \in E^{(-)}$, где $x \in P$, $t_j \in T$	Выходная дуга (t_j, x)
8		$(\&s_i, t_j) \in E^{(+)}$, где $\&s_i \in \Psi$, $t_j \in T$	Входная дуга – указатель $(\&s_i, t_j)$
9		$(t_j, \&s_i) \in E^{(-)}$, где $t_j \in T$, $\&s_i \in \Psi$	Выходная дуга – указатель $(t_j, \&s_i)$
10		$d \in D = D_p \cup D_q \cup D_s$	Позиция для хранения констант
11		$\omega \in \Omega$	Знак функции
12		$(\omega, x_1, \dots, x_i, \dots, x_k) \in \Phi$	Структура интерпретируемых формул (функция разметки дуги)
13		$((x, y), (\omega, x_1, \dots, x_i, \dots, x_k)) \in W$ $(x, y) \in E$, $(\omega, x_1, \dots, x_i, \dots, x_k) \in \Phi$ $\omega \in \Omega$, $x_i \in (P \cup \Psi \cup D)$, $\forall i$	Структура вычислительного элемента $V(x, y)$ дуги (x, y)

7) Ω – множество знаков стандартных и собственных функций (арифметических, логических, предикатных и т.д., табл.1, п.11):

$$\Omega = \Omega_\Lambda \cup \Omega_p \cup \Omega_q \cup \Omega_s.$$

8) Φ – множество структур интерпретируемых формул (табл.1, п.12): $\Phi \subseteq \Omega \times [\bigcup_{k=1}^{a} (P \cup \Psi \cup D)^k]$.

9) $W = W_\Lambda \cup W^{(+)} \cup W^{(-)}$ – однозначное отображение, сопоставляющее каждой дуге $(x, y) \in E$ вполне определенную (единственную) структуру из множества структур интерпретируемых формул Φ для установки зависимости разметки данной дуги от состояния сети: $W: E \to \Phi$, здесь элементы множества W представляют собой код (кортеж), описывающий структуру вычислительного элемента (ВЭ) $V(x, y)$ дуги (x,y): $((x,\ y), (\omega,\ x_{i_1},\ x_{i_2}, ...,\ x_{i_k})) \in W$, $(x,\ y) \in E$, $(\omega,\ x_{i_1},\ x_{i_2}, ...,\ x_{i_k}) \in \Phi$ (табл.1,п. 13).

При этом $((x,\ t), (\omega,\ x_{i_1},\ x_{i_2}, ...,\ x_{i_k})) \in W^{(+)}$, $((t,\ y), (\omega,\ x_{i_1},\ x_{i_2}, ...,\ x_{i_k})) \in W^{(-)}$ и $((\lambda,\ t), (\omega_\Lambda,\ x_{i_1},\ x_{i_2}, ...,\ x_{i_k})) \in W_\Lambda$ – структуры, соответственно, входных, выходных ВЭ и ВЭ для проверки активности перехода t. Набор ВЭ $V(x, y)$ дуг $(x,\ y)$, у которых или $x = t$, или $y = t$, а противоположными их концами являются соответствующие им позиции из множества $P \cup \Psi$, образуют вычислительный модуль (ВМ) $V(t)$ перехода t. ВСП состоит из определенного набора вычислительных модулей $V(t)$, $\forall t \in T$, взаимосвязанных через соответствующие позиции из $P \cup \Psi$.

10) μ – маркировка позиций P (моделирование состояния позиций сети):

$\mu = \mu_p \cup \mu_q \cup \mu_s$, $\mu_p : P_p \to N$, $N = \{0, 1, 2, ...\}$, $\mu_q : P_q \to R$, $R = (-\infty, +\infty)$, $\mu_s : P_s \to A^*$, где A^* – множество всех цепочек (слов) над алфавитом $A = \{A,\ B,\ C, ...,\ a,\ b,\ c, ...,\ 0, 1, 2, ..., 9, ...\}$, включая пустую цепочку ε. Модификацию состояния $\mu(x)$ позиций $x \in P$ производят соответствующие им ВЭ $V(t, x),\ V(x, t)$ переходов $t \in T$ в результате их срабатывания.

11) γ – маркировка переходов T (моделирование состояния переходов сети):

$\gamma : T \to \{0, 1\}$. Здесь γ является функциональным отображением, сопоставляющим каждому переходу $t_j \in T$ однозначно определенный элемент из двухэлементного множества $\{0, 1\}$. При $\gamma(t) = 1$ переход t – активный, в результате чего срабатывает ВМ $V(t)$. Иначе, т.е. при $\gamma(t) = 0$, переход t – пассивный, и ВМ $V(t)$ не срабатывает. Модификацию состояния $\gamma(t)$ перехода t производит ВЭ $V(\lambda,\ t)$ следующим образом: если $\lambda = \omega_\Lambda(x_{i_1},\ x_{i_2}, ...,\ x_{i_k})$, то $\gamma(t) = 1$, иначе $\gamma(t) = 0$. При срабатывании ВМ $V(t)$ активного перехода t срабатывают все ее ВЭ, в результате чего модифицируется состояние $\mu(x)$ всех позиций $x \in P$, соответствующих срабатываемым ВЭ по определенным правилам, в зависимости от типов функций $\omega(x_{i_1},\ x_{i_2}, ...,\ x_{i_k})$ разметок дуг этих ВЭ.

12) Указатель $\&s_i \in \Psi$ называется указателем на позицию $x \in P$, т.е. $\&s_i = x$, если состояние $\mu_s(s_i)$ памяти $s_i \in S$ данного указателя $\&s_i$ равно имени x указываемой позиции, т.е. $\mu_s(s_i) = x$, $x \in P \subset A^*$, $P = P_p \cup P_q \cup P_s$, $s_i \in S \subset P_s$.

Таким образом, как сказано в [3] ВСП имеет, в сравнении с существующими СП, следующие дополнительные вычислительные возможности:

- наличие позиций различных типов, т.е. числовых (дискретных P_p, непрерывных P_q) $P_p \cup P_q$ и символьных P_s, а также наличие среди набора функций разметки дуг функции возврата имени позиции и функций символьных обработок, позволяет осуществлять обработку символьно-числовой информации и эффективно решать задачи анализа топологии сложных систем;

- наличие указателей на различные типы позиций позволяет реализовать задачи, связанные с произвольной выборкой позиций из заданного множества, и за счет этого моделировать системы с перестраиваемой структурой;
- наличие позиций логических констант, дуг логического типа и предикатных функций разметки дуг логического типа, введенных для проверки активности переходов, позволяет достаточно легко разрешать проблемы конфликтов между ВМ ВСП и организовывать ситуационно управляемые параллельно-последовательные вычислительные процессы в зависимости от состояния их позиций.

Применение ВСП для решения задач электроэнергетики

Вышеперечисленный набор возможностей ВСП позволяет решать, например, следующие сложные актуальные задачи электроэнергетики:

- машинный анализ топологической структуры графа сложнозамкнутой электрической сети и построение ее математической модели (постановка задачи в [4]);
- решение задач на графах электрической сети;
- определение оптимальных мест размыкания сети (т.е. выбор оптимальной конфигурации сети), обеспечивающих минимум сезонных потерь электрической энергии [5];
- расчет надежности электрических сетей;
- управление технологией дискретного производства с целью равномерного потребления электрической энергии и обеспечения спроса рынка сбыта (постановка задачи в [6]);
- проектирование интеллектуальных автономных распределенных гибридных энергокомплексов с возобновляемыми источниками энергии (методика проектирования в работе [7]) и т.д.

Заключение

Таким образом, в данной работе внесено дополнение к расширению сетей Петри со значительно усиленной моделирующей возможностью, получившее название вычислительная сеть Петри, являющаяся обобщением и дальнейшим развитием самомодифицируемых, алгебраических сетей, обладающая универсальной вычислительной возможностью для обработки символьно-числовой информации и позволяющая строить самоорганизующиеся, многокомпонентные, структурно-подобные и удобные с позиций реализации на ЭВМ и интерпретации результатов вычислений модели сложных дискретных, непрерывных и дискретно-непрерывных систем, какими являются системы электроэнергетики, а также преодолевать проблемы, связанные с размерностью исследуемых систем, за счет возможности распараллеливания вычислительных процессов.

При этом ВСП, как было сказано ранее в работе [3], обладает следующими достоинствами: возможностью автоматизации формирования структурированных, легко интерпретируемых вычислительных алгоритмов; возможностью организации последовательно-параллельных вычислений, что существенно повышает быстродействие вычислительных процессов; коды ВСП являются одновременно и моделью, и алгоритмом, и программой реализации на ЭВМ; располагать вычислительные модули в текстах вычислительных алгоритмов в произвольном порядке, поскольку эти модули структурно и логически самоорганизовываются соответствующим образом, взаимодействуя через состояние позиций в процессе функционирования ВСП.

Литература:

1. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
2. Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридонов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении. – Л.: Наука. 1989 г.

3. М.С. Асанов. Структурная модель вычислительных сетей Петри / М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов. // Известия КГТУ. – 2008. – №13. – С. 78 – 85.

4. Асанова С.М. Моделирующий комплекс для оценки оптимального количества информации о текущем состоянии электроэнергетических систем. – Известия КГТУ им. И.Раззакова. Материалы МНТК «Инновации в образовании, науке и технике». – Т. I, №9. – Бишкек. – 2006. – С. 440 – 447.

5. Asanov M., Kokin S.,Satarkulov K., Asanova S.M., Dmitriev S., Safaraliev M.The use of Petri computing networks for optimization of the structure of distribution networks to minimize power losses. Energy Reports, Vol. 6, Supplement 9, December 2020, 1337–1343.

6. Арфан аль Хакам, Асанов М.С., Бримкулов У.Н. Организация технологии дискретного производства с целью равномерного потребления электрической энергии. Наука и новые технологии – №1. – Бишкек. – 2002. – С. 56 – 62.

7. Методика проектирования интеллектуальных автономных распределенных гибридных энергокомплексов с возобновляемыми источниками энергии / С. М. Асанова, С. М. Суеркулов, А. Б. Бакасова [и др.] // Проблемы автоматики и управления. – 2022. – № 1(43). – С. 21-32. – EDN VBMNSS.