

Министерство промышленности и науки Свердловской области
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Научно-производственное предприятие «Энергия и экология»
Академия электротехнических наук РФ
ЗАО «Уральские выставки»
ЗАО «Энергопромышленная компания»

ПРОБЛЕМЫ И ДОСТИЖЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Сборник докладов

XI Международной научно-практической конференции

ПДЭ – 11

в рамках выставки

«Энергетика и электротехника – 2012»

13–15 ноября 2012 г.

Екатеринбург
2012

Проблемы и достижения в промышленной энергетике: Сборник докладов XI Международной научно-практической конференции в рамках выставки «Энергетика и электротехника – 2012» (13 – 15 ноября 2012 г.). – Екатеринбург: ЗАО «Уральские Выставки», 2012. – 175 с.

Сборник докладов ученых, преподавателей, аспирантов и студентов вузов и колледжей, специалистов и сотрудников России, Казахстана, Чехии и Польши предприятий и организаций содержит результаты исследований и практической реализации в области производства, передачи, распределения и потребления электрической, тепловой и других видов энергии. Особое внимание уделяется электроэнергетике, теплоэнергетике, электротехнологии, преобразовательной технике, электроприводу, энергетической безопасности и энергосбережению.

Доклады в сборнике представлены без редакторской и корректорской правки.

Председатель оргкомитета – действительный
член Академии электротехнических наук РФ,
профессор, доктор технических наук
Ф.Н. Сарапулов

© ЗАО «Уральские выставки», 2012

© Авторы, 2012

АНАЛИЗ СЕТИ ПЕТРИ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ И ТОКА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 кВ

Б.Б. Утегулов, В.П. Марковский, А.К. Жумадилова

Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, Казахстан

В настоящей работе предлагается произвести анализ исходной сети Петри, моделирующей устройство контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ, для определения структурных и поведенческих свойств системы. На основе анализа сети Петри оценивается моделируемая система и вырабатываются решения по ее усовершенствованию и изменению.

Сети Петри являются одним из наиболее распространенных современных аппаратов для моделирования, анализа, синтеза и проектирования дискретных систем с параллельно протекающими процессами. Исходная сеть Петри, моделирующая устройство контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю и отображающая состояния системы и переходы из одного состояния в другое, которые необходимо произвести системе для определения значений активной и емкостной проводимости изоляции сети и тока однофазного замыкания на землю, приведена на рисунке 1. В результате декомпозиции исходной сети Петри для определения свойств системы получены функциональные подсети Петри (рисунок 2) и граф функциональных подсетей, координирующий запуск подсетей (рисунок 3).

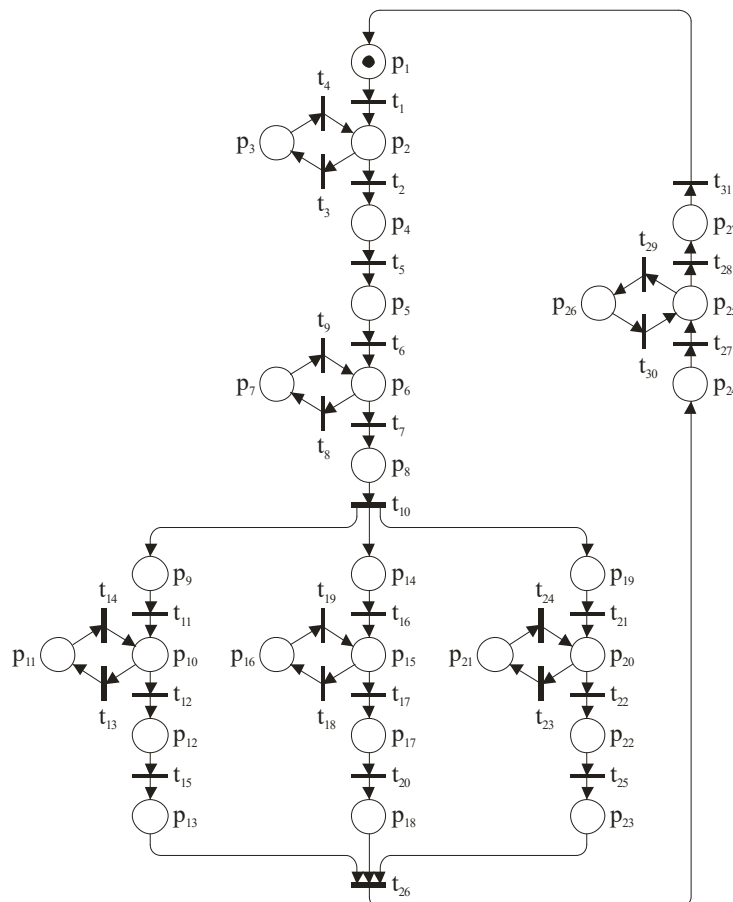


Рисунок 1. Сеть Петри, моделирующая устройство контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю

Основные свойства сетей Петри:

- безопасность – позиция сети Петри является безопасной, если число меток в ней никогда не превышает 1. Сеть Петри безопасна, если безопасны все позиции сети;
- ограниченность – сеть Петри называется k-ограниченной, если в любом состоянии в любой позиции скапливается не более k меток;
- сохранение – сеть Петри является сохраняющей, если она сохраняющая по отношению к некоторому положительному ненулевому вектору взвешивания;
- активность – переход является активным, если он нетупиковый. Если переход активен, то всегда можно перевести сеть Петри из ее текущей маркировки в маркировку, в которой запуск перехода станет разрешенным;
- достижимость и покрываемость маркировок.

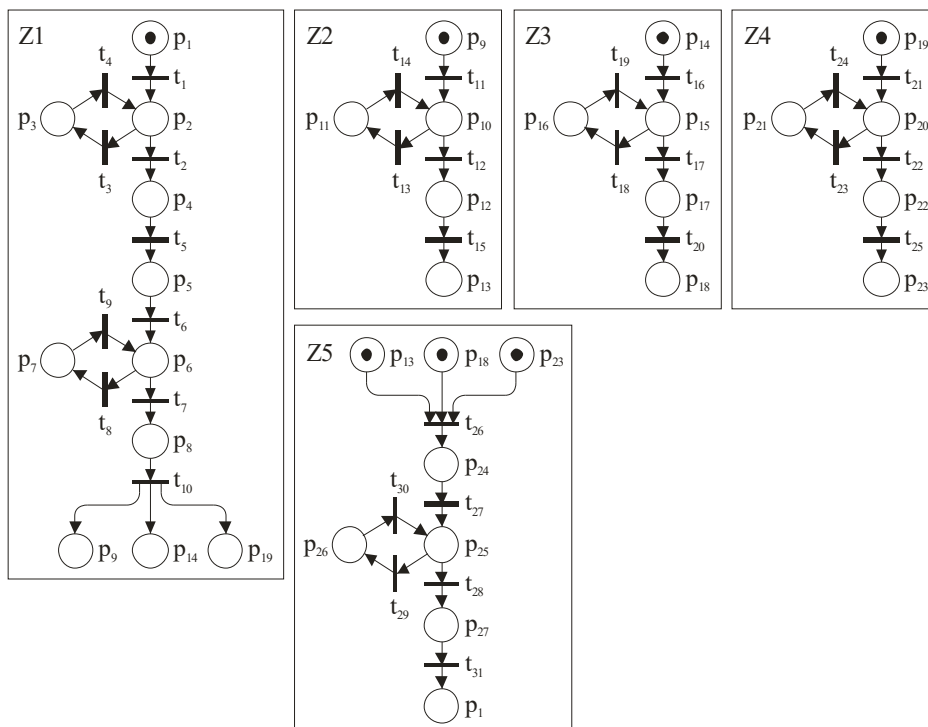


Рисунок 2. Функциональные подсети исходной сети

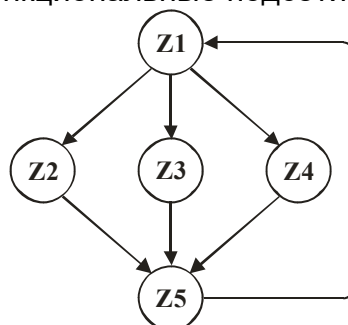


Рисунок 3. Граф функциональных подсетей исходной сети Петри устройства контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю

Существуют два основных метода анализа сетей Петри:

- матричные методы;
- методы, основанные на построении дерева покрываемости и графа достижимости.

Первая группа методов основана на матричном представлении маркировок и последовательностей запуска переходов.

Альтернативным по отношению к определению сети Петри в виде (T, P, F, M_0) является определение двух матриц D^- и D^+ , представляющих входную и выходные функции. Каждая матрица имеет m строк (по одной на переход) и n столбцов (по одному на позицию). D^- определяет входы в переходы, D^+ – выходы.

Матричная форма определения сети Петри

$$(T, P, D^-, D^+) \quad (1)$$

позволяет дать определения в терминах векторов и матриц.

Определим единичный вектор $e[j]$ размерности m , содержащий нули во всех позициях кроме той, которая соответствует запускаемому в данный момент переходу. Очевидно, что переход разрешен, если

$$\mu \geq e[j] \cdot D^- \quad (2)$$

Тогда результат запуска j -го перехода можно описать так

$$\mu' = \mu + e[j] \cdot D, \quad (3)$$

где $D = (D^+ - D^-)$ – матрица инцидентности.

Тогда

$$\mu = \mu_0 + \sigma D, \quad (4)$$

где μ – исследуемая маркировка;

σ – вектор, компоненты которого показывают, сколько раз срабатывает каждый переход (вектор запуска последовательности).

Произведем матричный анализ подсети Z1. Подсеть Z1, как видно из рисунка 2, имеет 11 состояний ($p_1 - p_9, p_{14}, p_{19}$) и 10 переходов ($t_1 - t_{10}$). Составляется матрица входов, каждый элемент равен числу меток, уходящих из j -позиции при запуске i -перехода. Далее составляется матрица выходов, каждый элемент равен числу меток, приходящих в j -позицию при запуске i -перехода. Матрица инцидентности определяется как разность между матрицей выхода и матрицей входа

$$D = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Получив матрицу инцидентности можно записать матричное уравнение смены маркировок вида (4). Вектор начальной маркировки подсети Z1 определяется как

$$\mu_{01} = (10000000000). \quad (6)$$

Достижимость произвольной маркировки подсети Z1 согласно (4) определяется из выражения

$$\mu = (10000000000) + \sigma \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

К примеру, необходимо определить достижимость маркировки $\mu = (00001000000)$ из начальной маркировки $\mu_{01} = (10000000000)$. В уравнении (7) вместо σ ставим неизвестный вектор X той же размерности, а вместо μ интересующую маркировку. Система не имеет однозначного решения, но сводится к множеству решений

$$f(\sigma) = (1, 1, x_3, x_4, 1, 0, 0, x_8, x_9, 0), \quad (8)$$

где x_3, x_4, x_8, x_9 – любое число.

Уравнение (8) определяет взаимосвязь между запусками переходов. Если $x_3 = x_4 = 1$, а $x_8 = x_9 = 0$, то

$$f(\sigma) = (1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0). \quad (9)$$

Полученное решение говорит о достижимости маркировки μ и указывает, какие из переходов и сколько раз должны быть для этого запущены.

Для определения свойства обратимости подсети Z1 составляется уравнение вида

$$X \cdot D = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) также не имеет однозначного решения

$$f(\sigma) = (0, 0, x_3, x_4, 0, 0, 0, x_8, x_9, 0). \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что подсеть является необратимой.

Матричный подход к анализу сетей Петри очень перспективен, но и имеет следующие недостатки:

- матрица инцидентности – D не отражает структуру сети Петри, переходы, имеющие как входы, так и выходы из одной позиции (петли), представляются соответ-

ствующими элементами матриц D^- и D^+ , но затем взаимно уничтожаются в матрице $D = (D^+ - D^-)$;

- отсутствие информации о последовательности запусков переходов;
- решение уравнения (4) является необходимым для достижимости, но недостаточным.
- возможность недействительных решений уравнения (4), то есть решений, которые не соответствуют возможным последовательностям переходов.

Дерево достижимости является наиболее универсальным средством анализа свойств практически любого класса сетей Петри. Почти все основные свойства сетей могут быть достаточно просто получены из дерева достижимости. На основе анализе дерева достижимости определяются следующие свойства сетей Петри:

- безопасности и ограниченности. Сеть Петри ограничена тогда и только тогда, когда символ ω отсутствует в её дереве достижимости. Отсутствие символа ω в дереве достижимости означает, что множество достижимых маркировок конечно. Следовательно, простым перебором можно найти верхнюю границу, как для каждой позиции в отдельности, так и общую верхнюю границу для всех позиций. Последнее означает ограниченность сети Петри. Если граница для всех позиций равна 1, то сеть Петри безопасна;
- сохранения. Так как дерево достижимости конечно, для каждой маркировки можно вычислить сумму начальной маркировки. Если эта сумма одинакова для каждой достижимой маркировки, то сеть Петри является сохраняющей. Если суммы не равны, сеть не является сохраняющей;
- покрываемость маркировок;
- живость – переход t сети Петри является потенциально живым, тогда и только тогда, когда он метит некоторую дугу в дереве достижимости этой сети.

Граф достижимости является ориентированным графом, каждая вершина которого соответствует определенной маркировке сети Петри, а дуга – переходу сети от одной маркировки к другой в результате срабатывания какого-либо перехода. Дуги графа помечены номерами этих переходов. Особенностью графа является то, что в нем не может быть одинаковых вершин, то есть вершин с одинаковыми маркировками.

Граф достижимости представляется как

$$GD = (V, E), \quad (12)$$

где $V = \{M_1, M_2, \dots, M_q\}$ – массив вершин (маркировок, соответствующих вершинам);

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ – массив дуг, связывающих вершины.

Дерево покрываемости маркировок сети представляет собой связанный граф, в вершинах которого находятся маркировки, которые достигаются в результате последовательного запуска разрешённых переходов, а на дугах, соединяющих вершины – запускаемые переходы. Путь от корня к каждой маркировке отражает последовательность запусков, приведшую к ней. Корнем дерева является начальная маркировка. При неограниченном накапливании меток в позиции на дереве образуется петля, а в маркировке на месте, соответствующем заикливившейся позиции, ставится “ ω ” – символ бесконечно большого числа.

На рисунке 4, а представлено дерево покрываемости маркировок функциональной подсети $Z1$. Дерево покрываемости удобно оформить в виде графа (рисунк 4, б). При этом более наглядно видны заиклививающиеся переходы, а тупиковые маркировки характеризуются отсутствием дуг, исходящих из данной

маркировки. При достижении старой маркировки достаточно соединить дугой предыдущую маркировку и уже существующую “старую”.

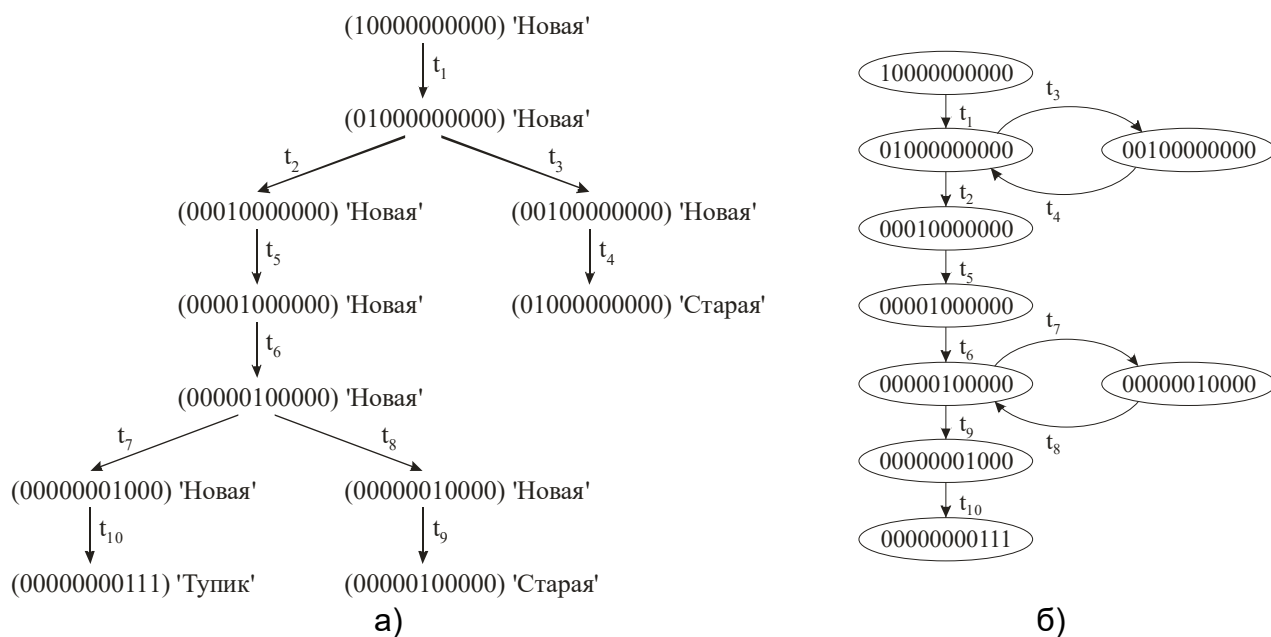


Рисунок 4

- а) дерево покрываемости маркировок функциональной подсети Z1;
- б) граф достижимости маркировок функциональной подсети Z1

С помощью полученного графа достижимости (рисунок 4, б) определяются следующие свойства подсети Z1:

- неживая (присутствует тупиковое состояние);
- ограниченная (сеть ограничена, если символ “ω” не входит ни в одну вершину графа);
- безопасная (сеть безопасна, если в метки вершин входят только “0” и “1”) – физически безопасность означает отсутствие заикливания;
- неправильная (если сеть безопасная и живая, то она правильная);
- необратимая (сеть обратима, если в графе имеется хотя бы одна дуга, направленная к начальной маркировке M0);
- отсутствие пассивных переходов.

На основе проведенного анализа подсетей Z1 – Z5 и графа функциональных подсетей исходной сети Петри устройства контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю, приведенного на рисунке 3, определяются свойства полной сети Петри (рисунок 1).

Интегральные свойства всей сети определяются путем композиции свойств подсетей. Все подсети Z1 – Z5 являются безопасными (ограниченными), следовательно, вся сеть Петри является безопасной (ограниченной). Во всех подсетях отсутствуют пассивные переходы, то и во всей сети пассивных переходов нет.

Как следует из графа функциональных подсетей, сеть Петри является живой и обратимой, так как в графе отсутствуют тупиковые состояния, и имеется дуга, направленная к начальной маркировке. Полученные свойства сети Петри характеризуют моделируемую систему.

На основе вышеизложенного следует, что сеть Петри, моделирующая устройство контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания в электрических сетях 6 – 10 кВ, является правильной сетью.

Научно-практическое издание

**ПРОБЛЕМЫ И ДОСТИЖЕНИЯ
В ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

Сборник докладов XI Международной научно-практической конференции
(Екатеринбург, 13–15 ноября 2012 г.)

В авторской редакции

Оригинал-макет Копырина Н.В., Ровбо А.А., Агафонова А.С.
Ответственный за выпуск Е.С. Краснова

Подписано в печать 07.11.2012 г.	Формат 60×84/8	Бумага типографская	
Усл. печ. л. 16,64	Уч.-изд. л. 14,93	Тираж 100 экз.	Заказ № 221

Издательство: ЗАО «Уральские Выставки»
Россия, 620027, Екатеринбург, ул. Свердлова, 11А, к. 505.
Тел. (343) 3555–195, 3703-375.