

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМ АГРЕГАТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСКРАШЕННОЙ СЕТИ ПЕТРИ

© 2020 Ш. С. Гусейнзаде✉

*Сумгаитский государственный университет
Сумгаит, 43-й блок, AZ5008, Азербайджан*

Аннотация. Статья посвящена моделированию нечеткого управления на сетях Петри (СП). Ставится задача разработки модели управления на СП с нечеткой логикой по информации, выраженной в лингвистической форме. На основе критериев работы водяного насоса в зависимости от изменяющего водопотребления определены всевозможные ситуации и события в системе. Для описания не полных знаний по поведению системы использованы лингвистические переменные «расход воды» и «скорость насоса». Термы этих переменных соответствуют их нечетким значениям и обозначаются выражениями, характеризующими одно из состояний системы. Фаззификация лингвистических переменных выполнена в среде Fuzzy Toolbox системы моделирования MATLAB. Описывая необходимое поведение системы отношениями между ситуациями и событиями с применением логики «Если... То...» разработана система правил управления насосного агрегата. Всевозможными ситуациями, событиями и отношениями между ними соответственно формированы множества позиций, переходов и дуг СП. Учитывая систему производственных правил управления и структурных элементов СП, разработан алгоритм управления насосного агрегата. На основе разработанного алгоритма управления определены функции входных и выходных инцидентий переходов в виде таблиц. Таблицы определяют матриц входных и выходных инцидентий переходов.

Разработана граф-модель СП. Модель описывает работу одного насосного агрегата. Визуализация модели реализована в системе CPN Tools (Colored Petri Nets Tools). Значения термов принимаются как атрибуты цветов раскрашенной сети Петри (PCPN) и с применением CPN ML (Colored Petri Nets Markup Language) присваивается маркерам сети. С помощью значений термов описывается поведение и желаемая реакция системы. Проведены симуляционные эксперименты соответственно ситуациям в системе и анализ модели на основе свойств СП.

Ключевые слова: сети Петри, алгоритм адаптации, управление водяными насосами, нечеткие значения, лингвистические переменные, термы переменных, функция принадлежности, матрица инцидентностей, симуляция сети, маркировка сети Петри.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих производственных объектах активно применяются автоматизированные системы управления. Интеллектуальные автоматизированные си-

стемы управления (ИАСУ) динамическими системами (ДС) функционируют на основе специального математического и программного обеспечения с применением методов искусственного интеллекта.

Многие энергетические объекты, в том числе водяные насосные агрегаты относятся к сложным ДС. Автоматизация насосных установок является важной проблемой благо-

✉ Гусейнзаде Шахла Сурхай
e-mail: shahla.huseynzade@gmail.com



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

даря ее обширным приложениям. В решении таких задач нечеткая логика обеспечивает мощную платформу, которая позволяет инженерам применять человеческие рассуждения к алгоритму управления [1].

При разработке интеллектуальной насосной системы важнейшим вопросом является выбор системы управления двигателем, для точной регулировки скорости соответственно режимам водопотребления. Водопотребление имеет ярко выраженные колебания в течение суток, недель, сезонов [2]. Это требует регулирования производительности установленного на станции насосного оборудования. Основой для математического описания потоков жидкости служат уравнения Навье — Стокса. Они описывают процессы в каждой точке потока при помощи дифференциальных уравнений в частных производных для баланса массы и количества движения насоса [3, 1]. Расчет каждой отдельной пространственной точки потока невыполним по причине высокой трудоемкости. В [4] формализовано представление о том, что существующая аналитическая техника недостаточна для решения этой задачи.

При создании ИАСУ известны разные подходы к построению моделей управления насосными агрегатами. В [5] предложен метод оптимизации работы регулятора скорости двигателя, основанный на нечеткой логике вместе с датчиком забойного давления. Нечеткое имитационное моделирование управления водяного насоса проявляется в симуляционных исследованиях с использованием MATLAB/ Simulink в различных атмосферных условиях [6]. TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation program — программа моделирования переходных систем) обеспечивает модульную компоновку технических систем [7]. Основным интерфейсом Simulink-а является графический инструмент для построения диаграмм и настраиваемый набор библиотек блоков [8]. Как TRNSYS, так и Simulink обеспечивают детальную конструкцию энергетических систем, не подходят для плавного регулирования существующих насосных агрегатов в зависимости от изменяющегося водопотребления.

Из краткого обзора литературных источников, посвященных подходам к построению систем управления насосным агрегатом, видно, что нечеткий метод управления насосными агрегатами рассматривается как эффективный способ снижения энергопотребления в водораспределительных процессах. Каждый из подходов имеет свои преимущества, недостатки и имеются не решенные проблемы при управлении насосных агрегатов, особенно в математическом описании потоков жидкости и нечеткой зависимости между производительными параметрами насосов.

Цель исследования определение возможностей модифицированных СП при разработке интеллектуального управления режимами работы насосных агрегатов при изменяющемся водопотреблении приводящего к повышению эффективности ИАСУ насосных станций.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предлагается с помощью алгоритмов управления, с применением имитационного моделирования на CPN Tools и элементов нечеткой логики вывести насосы в наиболее оптимальные рабочие режимы.

Ставится задача разработки нечеткой модели управления скоростью (частотой вращения) насосного агрегата (Рассматриваются основные принципы управления, но не детальная конструкция насосов) при функционировании по изменяющемуся суточному водопотреблению, которая состоит из ниже следующих этапов:

- Фаззификация управляющих воздействующих лингвистических переменных с применением приложения Fuzzy Toolbox пакета MATLAB;

- Формирование структурных элементов РСЦ на основе определенных всевозможных ситуаций, событий и связей между ними при функционировании насосного агрегата и разработка алгоритма управления насосным агрегатом;

- Построение граф модели на CPN Tools и объявление переменных, определение наборов цветов и функций модели с языком программирования CPN ML;

– Проведение компьютерных симуляционных экспериментов и анализ модели.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

СП — это интеграция графа и дискретной динамической системы, она может служить и статической, и динамической моделью представляемого с ее помощью объекта [9]: Сеть Петри формально представляется как набор вида $N(P, T, F, H, \mu^0)$, где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n > 0$ — конечное непустое множество позиций (иначе состояний или мест); $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $m > 0$ — конечное непустое множество переходов (событий); $F: P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$, $H: T \times P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ — соответственно функции входных и выходных инцидентностей, а отображение $\mu^0: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ начальная маркировка (разметка каждой позиции).

Графическим изображением сети Петри является двудольный ориентированный граф с двумя типами вершин. Вершины $p \in P$ изображаются кружками, а вершины $t \in T$ — прямоугольниками. Дуги соответствуют функциям инцидентности позиций и переходов. В сетях Петри последовательности событий отображаются срабатываниями переходов.

РСП расширяют СП типами данных, функциями и модулями. РСП используются для разработки компактной, редактируемой и гибкой модели, которая позволяет получить важных информации о динамическом поведении и показателях производительности системы [10, 11]. CPN Tools — широко используемый программный инструмент, поддерживающий построение, моделирование и анализ исполняемых моделей на основе РСП. CPN Tools объединяет СП с языком программирования, чтобы получить масштабируемый язык моделирования для ДС [12].

Управление и верификация сложных ДС в основном проводится в среде неопределенности нечеткого характера поступающей информации и принимаемых решений. Для описания неопределенностей применяются методы нечеткой логики, использующие качественные характеристики и лингвистические переменные для формализации неопределенности [13]. Нечеткое управление (Fuzzy

Control) возникло как технология, способная расширить возможности автоматизации производства с применением общей методологии теории нечетких множеств и нечеткой логики, предназначена для решения прикладных задач в области управления [14].

3. ФАЗЗИФИКАЦИЯ ПЕРЕМЕННЫХ

Возможности представления эмпирических знаний как правила «Если... То...» позволяют использовать нечеткую логику в технических приложениях [15]. Главным достоинством данной теории является использование не подтвержденных данных для управления системой. Термы лингвистической переменной «расход воды» соответствует ее нечеткому значению и обозначается выражением, характеризующей одно из состояний системы. Соответствие значений лингвистических переменных «расход воды» и «скорость насоса» определена методом логического вывода — алгоритмом Мамдани на основе правил управления. Для введения нечеткости в модель управления выполняется фаззификация переменных. Наиболее приспособленной средой реализации фаззификации является система MATLAB.

Входная лингвистическая переменная «расход воды» (water consumption) определяется в множестве (универсуме) $A = [30, 120]$ (условная единица) и имеет терм множество $T =$ («небольшой», «средний», «большой»). Для фаззификации входной переменной «расход воды» использована кусочно-линейная треугольная функция принадлежности в универсуме A и построены три нечетких множеств — $\tilde{A}_1 = \{30, 66\}$, $\tilde{A}_2 = \{39, 75, 111\}$, $\tilde{A}_3 = \{84, 120\}$ и три функции принадлежности кусочно-линейного треугольного типа в графическом виде соответственно значениям терм множества (рис. 1). Функции принадлежности названы — “nb”, “sr”, “b” соответственно именам термов «небольшой», «средний», «большой».

Лингвистическая переменная «скорость насоса» (pump speed) определяется в множестве (универсуме) $B = [0, 1000]$ (условная единица) и имеет терм множество $T =$ («низ-

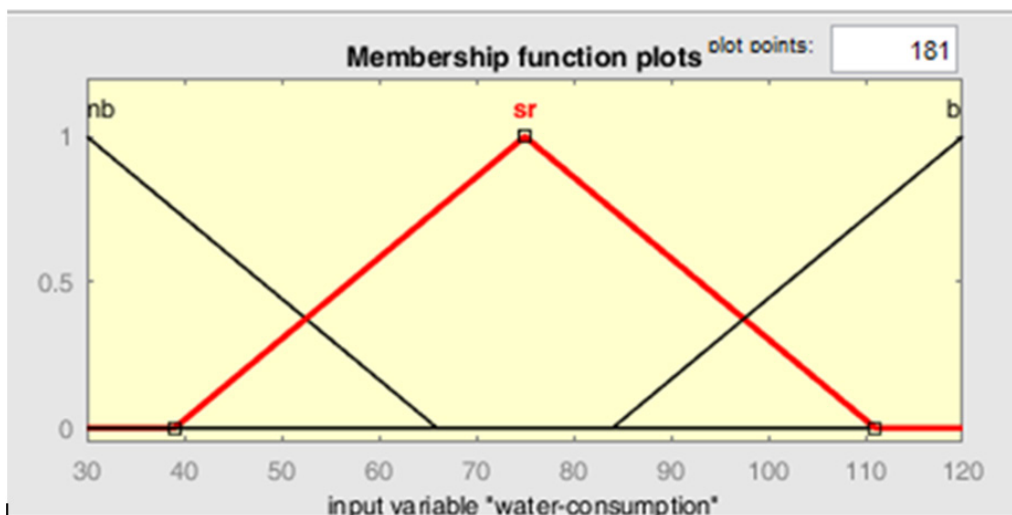


Рис. 1. Функции принадлежности лингвистической переменной «расход воды»
 [Fig. 1. Membership Functions of the Linguistic Variable «Water Consumption»]

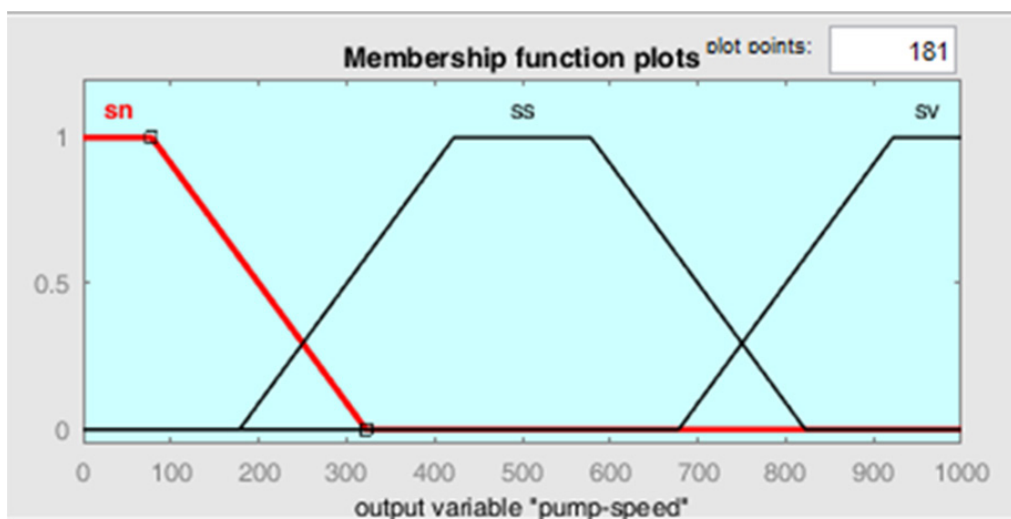


Рис. 2. Функции принадлежности лингвистической переменной «скорость насоса»
 [Fig. 2. Membership functions of the linguistic variable «pump speed»]

кая», «средняя», «высокая»). Для лингвистической переменной «скорость насоса» в универсуме B построены три нечетких множеств — $\tilde{B}_1 = \{0, 77.99, 322.1\}$, $\tilde{B}_2 = \{177.9, 422, 578, 822.1\}$, $\tilde{B}_3 = \{677.9, 922, 1000\}$ и три функции принадлежности кусочно-линейного трапециевидного типа в графическом виде соответственно значениям терм множества (рис. 2). Функции принадлежности названы — “sn”, “ss”, “sv” соответственно именам термов «низкая», «средняя», «высокая».

4. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СП И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМ АГРЕГАТОМ

На основе всевозможных состояний и событий при управлении работы водяных насосов формируются множества позиций и переходов СП:

- Позиции:

p_1 — в датчике регистрации имеется входная информация;

p_2 — насос включен;

p_3 — насос отключен;

- p_4 — расхода воды нет;
- p_5 — расход воды небольшой;
- p_6 — расход воды средний;
- p_7 — расход воды большой;
- p_8 — скорость насоса низкая;
- p_9 — скорость насоса средняя;
- p_{10} — скорость насоса высокая.

• Переходы:

- t_1 — ввод данных из регистрационного датчика в систему;
- t_2 — включение насоса;
- t_3 — отключение насоса;
- t_4 — не производить включение насоса;
- t_5 — перевести рабочую скорость к низкому значению;
- t_6 — перевести рабочую скорость к среднему значению;
- t_7 — перевести рабочую скорость к высокому значению.

Алгоритм функционирования объекта управления будет иметь вид последовательности команд. Команды, выражающие отношения переходов с входными позициями:

1. if p_1 then t_1 ;
2. if p_4 and p_3 then t_4 ;
3. if p_4 and p_2 and (p_8 or p_9 or p_{10}) then t_3 ;
4. if p_5 and p_3 then t_2 ;
5. if p_5 and p_2 and p_9 then t_5 ;
6. if p_5 and p_2 and p_{10} then t_5 ;
7. if p_5 and p_2 and not p_9 and not p_{10} then t_5 ;
8. if p_6 and p_3 then t_2 ;
9. if p_6 and p_2 and p_8 then t_6 ;
10. if p_6 and p_2 and p_{10} then t_6 ;
11. if p_6 and p_2 and not p_8 and not p_{10} then t_6 ;
12. if p_7 and p_3 then t_2 ;
13. if p_7 and p_2 and p_8 then t_7 ;
14. if p_7 and p_2 and p_9 then t_7 ;
15. if p_7 and p_2 and not p_8 and not p_9 then t_7 ;

Команды, выражающие отношения переходов с выходными позициями:

16. if t_1 then p_4 or p_5 or p_6 or p_7 ;
17. if t_2 then p_2 and (p_5 or p_6 or p_7);
18. if t_3 then p_3 ;
19. if t_4 then p_3 ;
20. if t_5 then p_2 and p_8 ;
21. if t_6 then p_2 and p_9 ;
22. if t_7 then p_2 and p_{10} .

5. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФ МОДЕЛИ НА CPN TOOLS И ОБЪЯВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ

На основе выше представленного алгоритм функции входных и выходных инцидентов переходов можно представить соответственно в виде таблиц (табл. 1. и табл. 2.).

Табл. 1. Функция входных инцидентов переходов

[Tabl. 1. The function of the input transition incidents]

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
p_1	1	0	0	0	0	0	0
p_2	0	0	1	0	1	1	1
p_3	0	1	0	1	0	0	0
p_4	0	0	1	1	0	0	0
p_5	0	1	0	0	1	0	0
p_6	0	1	0	0	0	1	0
p_7	0	1	0	0	0	0	1
p_8	0	0	1	0	0	1	1
p_9	0	0	1	0	1	0	1
p_{10}	0	0	1	0	1	1	0

Табл. 2. Функция выходных инцидентов переходов

[Tabl. 2. The function of the output transition incidents]

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}
t_1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
t_2	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0
t_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
t_4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
t_5	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
t_6	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
t_7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Представляя позиции кругами, переходы прямоугольниками, а отношения между ними соединяющими дугами, строится модель на CPN Tools (рис. 3.).

Язык моделирования CPN ML объединяет СП и язык программирования [16]. Используя это свойство структура организована в системе CPN Tools с синхронизацией языка CPN ML с пакетом MATLAB. Для построения

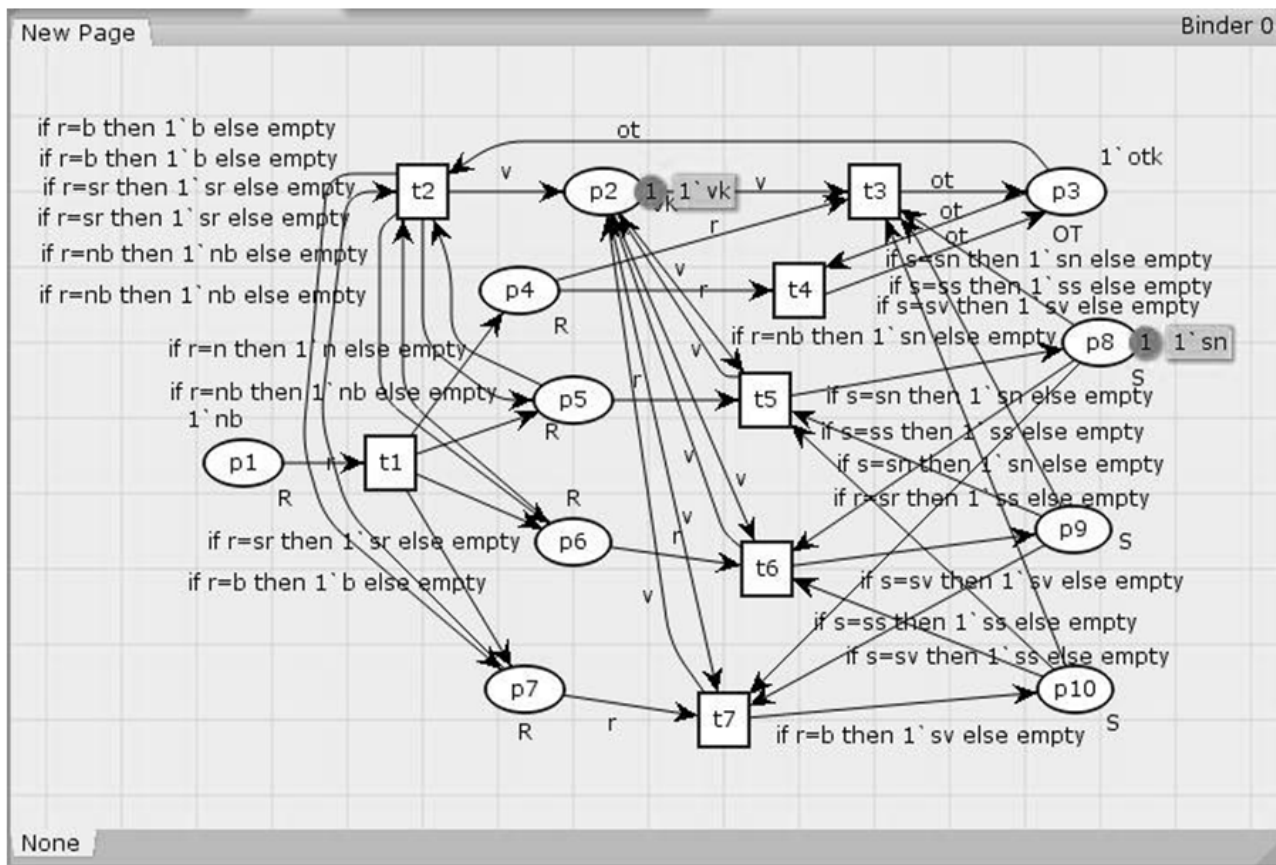


Рис. 4. Граф-модель нечеткой раскрашенной СП системы управления насосным агрегатом соответствующей 3-му шагу симуляции сети
 [Fig. 4. Graph model of the fuzzy colored PN control system of the pump unit corresponding to the 3-rd step of the network simulation]

Табл. 3. Изменения маркировки при симуляции

[Tabl. 3. Changes to marking during simulation]

Срабатываемый переход	Изменения маркировки
	$\mu^0 = \{nb, \varepsilon, otk, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon\}$
t_1	$\mu^1 = \{\varepsilon, \varepsilon, otk, \varepsilon, nb, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon\}$
t_2	$\mu^2 = \{\varepsilon, vk, \varepsilon, \varepsilon, nb, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon\}$
t_5	$\mu^3 = \{\varepsilon, vk, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, sn, \varepsilon, \varepsilon\}$
...	...

насос включен и скорость насоса средняя (рис. 4.).

На разработанной в статье модели можно отрабатывать принципы управления, соответствующие ситуациям, выявлять недостатки, тупиковые состояния и вносить корректировки. Это позволит без лишних затрат настроить систему на оптимальный режим

работы. На основе матричной теории СП и дерева достижимостей, полученной при симуляции можно произвести анализ моделируемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективное регулирование с применением нечеткой системы управления насосного агрегата может снизить энергопотребление по сравнению с управлением традиционными методами. Полученные результаты наряду с практическими качествами, также имеет теоретическое значение. Потенциальные области применения разработанного подхода можно найти при создании ИАСУ термического, водораспределительного, нефтедобывающего производства и в системах диспетчерского управления дискретных событий, функционирующих в неопределенной среде с нечетким характером параметров.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frank, M. W. Fluid Mechanics / M. W. Frank. – New York : McGraw Hill, 2011. – 885 p.
2. Здор, Г. Н. Автоматическое управление группой насосных агрегатов с целью снижения затрат электроэнергии / Г. Н. Здор, А. В. Сеницын, О. А. Аврутин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – Т. 60, № 1. – С. 54–66. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-54-66
3. Ковеня, В. М. Об одном алгоритме решения уравнений Навье – Стокса вязкой несжимаемой жидкости / В. М. Ковеня // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 39–51. <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=807>
4. Terence, T. Finite time blowup for an averaged three-dimensional Navier-Stokes equation / T. Terence // J. Amer. Math. Soc. – 2016. – No 29. – P. 601–674. DOI: doi.org/10.1090/jams/838
5. Ceballos, J. B. Mathematical model of controllers for progressive cavity pumps / J. B. Ceballos, O. A. Vivas // Uis Ingenierias. – 2019. – V. 18, № 2. – P. 17–29. DOI: 10.18273/revuin.v18n2-2019002
6. Murshid, S. Implementation of PMSM Drive for a Solar Water Pumping System / S. Murshid, B. Singh // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2019. – V. 55, № 5. – P. 4956–4964. DOI: 10.1109/tia.2019.2924401
7. TRNSYS 18. – Access mode: <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html>. – (accessed: 16.07.2020).
8. SIMULINK. – Режим доступа: <https://exponenta.ru/simulink>. – (Дата обращения: 16.07.2020).
9. Peterson, J. L. Petri net theory and the modeling of systems. / J. L. Peterson – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1981. – 290 p.
10. Nabi, H. Z. Performance evaluation of a carousel configured multiple products flexible manufacturing system using Petri net / H. Z. Nabi, T. Aized / Operations Management Research. – 2020. DOI:10.1007/s12063-020-00151-2
11. Мустафаев, В. А. Разработка модели управления обрабатывающего центра с применением раскрашенных сетей Петри / В. А. Мустафаев, Ш. С. Гусейнзаде // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2018. – № 3(165). – С. 36–44. DOI: 10.14489/vkit.2018.03.pp.036-044
12. Jensen, K. Colored Petri Nets: A Graphical Language for Formal Modeling and Validation of Concurrent Systems / K. Jensen, L. M. Kristensen // Communications of the Acm. – 2015. – V. 58, № 6. – P. 61–70. DOI: 10.1145/2663340
13. Zadeh, L. A. “Fuzzy sets and information granularity” in Advances in Fuzzy Set Theory and Applications / L. A. Zadeh, M. M. Gupta, R. K. Ragade, and R. R. Yager, [eds.]. – Amsterdam: North Holland, 1979. P. 3–18.
14. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
15. Tavakolpour-Saleh, A. R. Adaptive Fuzzy Control of a Nonlinear Tank Process World Academy of Science, Engineering and Technology / A. R. Tavakolpour-Saleh, H. Jokar // International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. – 2016. – V. 10, No 2. – P. 416–424. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.1129618
16. Kristensen, L. M. Application of coloured Petri nets in system development / L. M. Kristensen, J. B. Jorgensen, K. Jensen // Lectures on Concurrency and Petri Nets: Advances in Petri Nets. – 2004. – V. 3098. – P. 626–685.

Гусейнзаде Шахла Сурхай – канд. техн. наук, доцент кафедры Информатики, Сумгаитский государственный университета, г. Сумгаит, Азербайджан.

E-mail: shahla.huseynzade@gmail.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4773-7328>

DEVELOPMENT OF A FUZZY MODEL FOR THE CONTROL OF A PUMP UNIT WITH THE APPLICATION OF A COLOURED PETRI NET

© 2020 Sh. S. Huseynzade✉

*Sumgayit State University
block 43, AZ5008, Sumgayit, Azerbaijan*

Annotation. The article is devoted to fuzzy control modelling based on Petri nets (PN). The aim of the study was to develop a Petri net-based control model with fuzzy logic for information expressed in a linguistic form. The criteria of the water pump's operation, depending on the changing water consumption, were used to determine various situations and events in the system. Linguistic variables such as "water flow rate" and "pump speed" were used to describe incomplete knowledge about the system's behaviour. The terms of these variables correspond to their fuzzy values and are denoted with expressions characterizing one of the system's states. The fuzzification of linguistic variables was implemented in the Fuzzy Toolbox environment of the MATLAB modelling system. A system of rules for the pump unit's control was developed by means of describing the required behaviour of the system by the relationship between situations and events using the logic «If ... Then ...». All sorts of situations, events, and relations between them formed sets of PN positions, transitions, and arcs. An algorithm for the control of the pump unit was developed with the consideration of the system of the production rules of control and PN structural elements. Based on the developed control algorithm, the functions of the input and output transition incidents were defined and shown in tables. The tables define the matrices of the input and output transition incidents.

The PN graph model was developed. The model describes the operation of one pump unit. The visualization of the model was implemented in the CPN Tools system (Coloured Petri Nets Tools). The values of the terms are taken as attributes of the colours of the coloured Petri net (CPN) and by using CPN ML (Coloured Petri Nets Tools Markup Language) are assigned to the network markers. The values of the terms were used to describe the behaviour and the desired reaction of the system. Simulation experiments referring to the system's situations and model analysis were carried out.

Keywords: Petri nets, adaptation algorithm, water pump control, fuzzy values, linguistic variables, terms of variables, membership function, incidence matrix, network simulation, Petri network marking.

CONFLICT OF INTEREST

The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Frank M. W. Fluid Mechanics. New York: McGraw Hill, 2011.

2. Zdor G. N., Sinicyn A. V., Avrutin O. A. Avtomaticheskoe upravlenie gruppoy nasosnyh agregatov s cel'ju snizheniya zatrat jelektroenergii [Automatic control of a group of pumping units in order to reduce energy costs]. Jenergetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenij i jenerg. ob#edinenij SNG. 2017. 60(1). P. 54–66. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-54-66

3. Kovenja V. M. Ob odnom algoritme reshenija uravnenij Nav'e-Stoksa vjazkoj neszhi-maemoj zhidkosti [An algorithm for solving the Navier – Stokes equations for a viscous incompressible fluid]. Vychislitel'nye tehnologii. 2006. 11(2). P. 39–51. (in Russian)

✉ Huseynzade Shahla Surkhay
e-mail: shahla.huseynzade@gmail.com

4. *Terence T.* Finite time blowup for an averaged three-dimensional Navier-Stokes equation // *J. Amer. Math. Soc.* 2016. 29, P. 601–674. DOI: <https://doi.org/10.1090/jams/838>
5. *Ceballos J. B., Vivas O. A.* Mathematical model of controllers for progressive cavity pumps // *Uis Ingenierias.* 2019. 18(2). P. 17–29. DOI: [10.18273/revuin.v18n2-2019002](https://doi.org/10.18273/revuin.v18n2-2019002)
6. *Murshid S., Singh B.* Implementation of PMSM Drive for a Solar Water Pumping System // *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2019. 55(5). P. 4956–4964. DOI: [10.1109/tia.2019.2924401](https://doi.org/10.1109/tia.2019.2924401)
7. TRNSYS 18. Available at: <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html>. (accessed: 16.07.2020).
8. SIMULINK. Available at: <https://exponenta.ru/simulink> (Дата обращения: 16.07.2020).
9. *Peterson J. L.* Petri net theory and the modeling of systems. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981.
10. *Nabi H. Z.* Performance evaluation of a carousel configured multiple products flexible manufacturing system using Petri net / H. Z. Nabi, T. Aized / *Operations Management Research.* – 2020. DOI: [10.1007/s12063-020-00151-2](https://doi.org/10.1007/s12063-020-00151-2)
11. *Mustafayev V. A., Huseynzade S. S.* Development of the control model of the processing center through colored petri networks // *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii.* 2018. No 3. P. 36-44. DOI: [10.14489/vkit.2018.03.pp.036-044](https://doi.org/10.14489/vkit.2018.03.pp.036-044)
12. *Jensen K., Kristensen L. M.* Colored Petri Nets: A Graphical Language for Formal Modeling and Validation of Concurrent Systems // *Communications of the Acm.* 2015. 58(6). P. 61–70. DOI: [10.1145/2663340](https://doi.org/10.1145/2663340)
13. *Zadeh L. A.* “Fuzzy sets and information granularity” in *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications* / L. A. Zadeh, M. M. Gupta, R. K. Ragade, and R. R. Yager, [eds.]. – Amsterdam: North Holland, 1979. P. 3–18.
14. *Leonenkov A. V.* Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzy TECH [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzy TECH]. SPb. : BHV-Peterburg, 2005. (in Russian)
15. *Tavakolpour-Saleh A. R., Jokar H.* Adaptive Fuzzy Control of a Nonlinear Tank Process World Academy of Science, Engineering and Technology / A.R. Tavakolpour-Saleh, H. Jokar // *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering.* 2016. V. 10, No 2. P. 416–424. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.1129618
16. *Kristensen L. M., Jorgensen J. B., Jensen K.* Application of coloured Petri nets in system development // *Lectures on Concurrency and Petri Nets: Advances in Petri Nets.* 2004. 3098. P. 626–685.

Huseynzade Shahla Surkhay – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, department of Informatics, Sumgayit State University, Sumgayit, Azerbaijan.
E-mail: shahla.huseynzade@gmail.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4773-7328>