

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, НГТУ, г. Новосибирск

Заместитель главного редактора

С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

А.А. Воевода, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Редакционная коллегия

Ю.Е. Воскобойников, д-р физ.-мат. наук, проф., СибСТРИН, г. Новосибирск

Ю.Д. Григорьев, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ (ЛЭТИ), г. С.-Петербург

А.М. Малышенко, д-р техн. наук, проф., ТПУ, г. Томск

Ю.Ф. Мухомад, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, ИрГУПС, г. Иркутск

А.И. Рубан, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ,

СФУ, Ин-т косм. и информ. технологий, г. Красноярск

В.И. Хабаров, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Журнал зарегистрирован

в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания

и средств массовых коммуникаций в 2002 г.

(свидетельство ПИ № 77-11739 от 08 февраля 2002 г.)

Адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: ucit@ucit.ru

Web site: <http://journals.nstu.ru/sbornik/>

Editorial adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

**СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ISSN 2307-6879

№ 3 (98)

2020

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

- Воевода А.А., Шипагин В.И.** Структурные преобразования нейросетевого регулятора с рекуррентным типом сети 7

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Ишутин И.А., Чепуров А.А., Жимулев Е. И.** Особенности внутренней структуры металл-алмазных композитов, полученных при высоком давлении 17

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ

- Бобин К.Н., Бобин П.Н., Толмачёв В.В.** Моделирование формообразования эластичной средой кольцевого листового образца из алюминиевого сплава 30
- Кузнецов М.А., Калинин С.В., Черкаев А.С., Остергак Д.И.** Исследование интерфейса внедрения физических моделей в среде TCAD Sentaurus 39
- Гриф М.Г., Бельгибаев Б.А., Умаров А.А.** Разработка «Умной теплицы» на основе модели «растение–среда–ситуация–управление» 49

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *Л.Н. Кинит*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Лицензия № ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 16.11.2020. Выход в свет 18.11.2020
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз. Уч.-изд. л. 3,72
Печ. л. 4,0. Изд. № 37. Заказ № 329. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Editorial board

Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

Vostretsov A.G., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, RF

Deputy Chief Editor

Kharitonov S.A., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A.A., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Voskoboinikov Yu.E., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State University of Architecture
and Civil Engineering, Novosibirsk, RF

Grigor'ev Iu.D., D. Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Saint-Petersburg, RF

Malysenko A.M., D. Sc. (Eng.), National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, RF

Mukhopad Iu.F., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State University of Railway Engineering,
Irkutsk, RF

Ruban A.I., D. Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF

Khabarov V.I., D. Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF

*The journal is registered
in the RF Ministry for press, broadcasting
and masscommunications in 2002
(certificate PI № 77-11739 from February 08, 2002)*

Editorial address: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation.

E-mail: ucit@ucit.ru

Web Site: <http://journals.nstu.ru/sbornik/>

© Authors, 2020

© Novosibirsk State

Technical University, 2020

CONTENTS

AUTOMATIC CONTROL AND IDENTIFICATION

- Voevoda A.A., Shipagin V.I.** Structural transformations of a neural network controller with a recurrent network type..... 7

MATERIALS SCIENCE

- Ishutin I.A., Chepurov A.A., Zhimulev E.I.** Features of the internal structure of high-pressure metal-diamond composites..... 17

MODELLING OF PROCESSES AND DEVICES

- Bobin K.N., Bobin P.N., Tolmachev V.V.** Modeling of formation ring sheet sample from aluminum alloy by elastic medium stamping 30
- Kuznetsov M.A., Kalinin S.V., Cherkaev A.S., Ostertak D.I.** Investigating physical model interface in the TCAD Sentaurus environment 39
- Grif M.G., Belgibaev B.A., Umarov A.A.** Development of a “smart greenhouse” based on the model “plant–environment–situation–control” 49

Editor *L.N. Kinsht*
Publishing Editor *I.P. Brovanova*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

License № ID 04303 from 20.03.01. Signed in print November 16, 2020.
Date of publication November 18, 2020. Format 60 × 84 1/16.
Offset Paper. Circulation is 50 copies. Educational-ed. liter. 3,72. printed pages 4,0.
Publishing number 37. Order number 329

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
630073, Novosibirsk, 20 K. Marx prospekt

*АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

УДК681.513

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-7-16

**СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО
РЕГУЛЯТОРА С РЕКУРРЕНТНЫМ ТИПОМ СЕТИ***

А.А. ВОЕВОДА¹, В.И. ШИПАГИН²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики. E-mail: uscit@uscit.ru

² 630087, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: shipagin@mail.ru

Усложнение объектов регулирования, а также повышение требований к производительности используемых регуляторов приводит к усложнению применяемых нейросетевых регуляторов. В качестве одного из усложнений можно считать появление обратных связей в регуляторе, т. е. переход от сетей прямого распространения к рекуррентным. Одной из проблем при их использовании является настройка весовых коэффициентов методами, основанными на вычислении градиентов (например, метод обратного распространения ошибки, метод Левенберга–Марквардта и т. д.). Она проявляется во внезапно «исчезающем» или «взрывающемся» градиенте, а значит, в прекращении процесса обучения сети. Целью настоящей статьи является выработка предложений по решению некоторых проблем настройки весовых коэффициентов для рекуррентной нейросети. В качестве методов для достижения обозначенной цели применяются структурные преобразования архитектуры рекуррентной нейросети для приведения ее к виду сети прямого распространения. При этом происходит некоторое увеличение сложности ее архитектуры. Для сетей прямого распространения методы, основанные на вычислении обратных градиентов, могут применяться без модификации. В дальнейшем планируется повысить производительность регулирования системы с помощью преобразованного нейрорегулятора, а именно уменьшить перерегулирование системы, и после некоторых усложнений структуры использовать ее для регулирования нелинейного объекта.

Ключевые слова: нейрорегулятор, система управления, многоканальная система, архитектура нейронной сети, рекуррентные нейросети, обучение нейросети, структурные преобразования нейрорегулятора

* Статья получена 01 сентября 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

Для моделирования временных рядов в 1980-х годах был предложен рекуррентный тип нейронной сети [1–3]. Основное отличие этой архитектуры от сети прямого распространения состоит в том, что в ней допускается наличие связей между скрытыми единицами, связанными с задержкой во времени. Это свойство дает возможность сохранять информацию о прошлых входных данных, а значит, позволяет выявлять временные зависимости между событиями, которые, возможно, нахоятся далеко друг от друга.

В настоящей работе рассматривается регулятор, действующий на систему «перевернутый маятник». Полученная архитектура предполагает наличие обратных связей. Это означает, что имеем дело с архитектурой рекуррентной нейронной сети. Однако при ее настройке возникают проблемы. Вопросы настройки рекуррентных нейронных сетей широко описаны в современной литературе [4–8]. Эта проблема описывается как проблема внезапно «исчезающих» или «взрывающихся» градиентов.

В ходе исследования получено подтверждение обозначенных проблем. Через несколько итераций градиенты принимали значение *inf* либо нечисловое значение *NaN*. Так, согласно документации Matlab, может обозначаться бесконечное значение и значения, не являющиеся вещественными и комплексными числами соответственно [9]. После чего процесс настройки обрывается.

Настоящая работа посвящена попытке решения вышеуказанного вопроса, а именно переходу от рекуррентного типа сети к сети прямого распространения с помощью некоторых структурных преобразований. Сеть прямого распространения более легко обучается.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве объекта для регулирования взят классический пример – «перевернутый маятник на тележке». Более подробно этот объект описан в статьях [10, 11]. Используется в линейном варианте. Линеаризованный вариант рассчитан при $\theta = 0$ и $\dot{\theta} = 0$.

В статье [10] используются следующие уравнения движения «перевернутого маятника»:

$$\left(1 - \frac{ml}{M_t L}\right) \ddot{s} + \frac{ml}{M_t L} g \theta = \frac{1}{M_t} u, \quad (1)$$

$$\left(1 - \frac{ml}{M_t L}\right) \ddot{\theta} - \frac{g}{L} \theta = -\frac{1}{M_t L} u. \quad (2)$$

Структурная схема объекта показана на рис. 1.

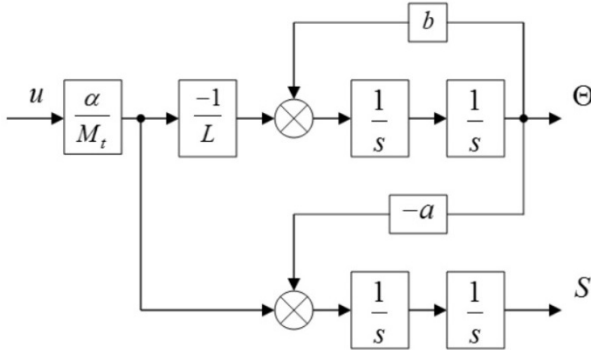


Рис. 1. Структурная схема объекта

Так как в этом объекте один вход (управляющее воздействие на тележку маятника u) и два выхода объекта – регулируемые величины (положение тележки S и угол отклонения маятника Θ), то он относится к многомерным. Объект является неустойчивым.

Для регулирования объекта используется дискретный регулятор с шагом дискретизации 0,05 с. Структурная схема выглядит следующим образом (рис. 2).

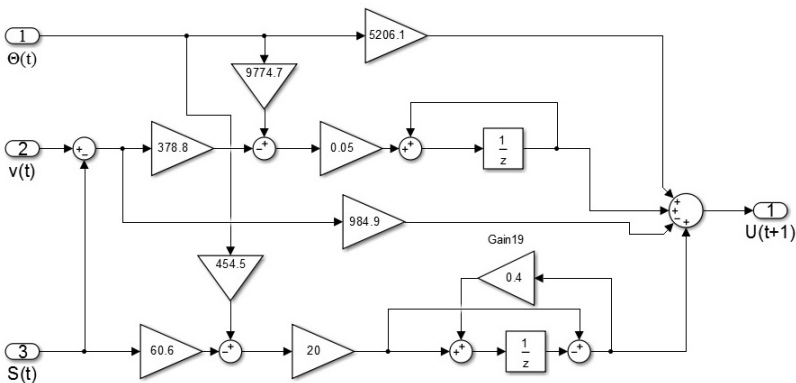


Рис. 2. Структурная схема дискретного регулятора

В качестве входов используются: $\Theta(t)$ – информация об угле отклонения маятника, $\nu(t)$ – задающее воздействие на положение тележки маятника, $S(t)$ – информация о положении тележки с маятником. Выход регулятора – управляющее воздействие на объект $u(t+1)$.

Используя сумматоры, коэффициенты усиления и звенья запаздывания, нейросетевой вариант структуры принимает следующий вид (рис. 3).

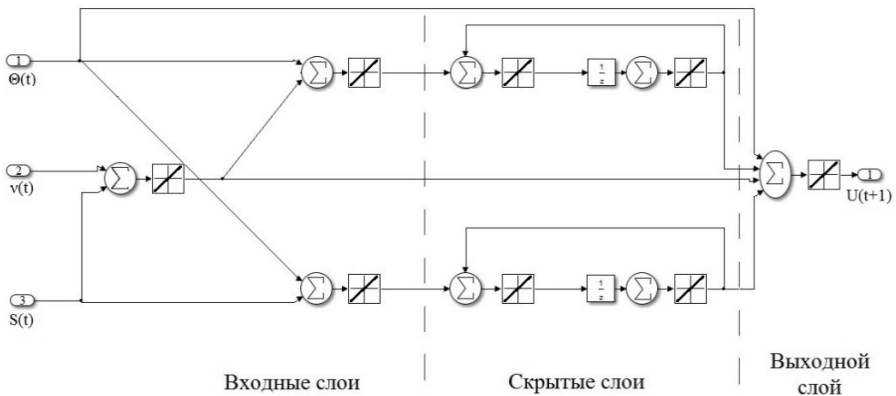


Рис. 3. Нейросетевая архитектура регулятора

Нейросеть, так же как и дискретный регулятор, содержит 3 входа и один выход. Архитектура представлена пятью слоями. В качестве функций активации используются линейные. Смещения не используются. Как видим, нейросетевой вариант содержит обратные связи, а значит, относится к типу рекуррентных нейросетей.

В следующем разделе статьи будет показана проблема обучения рекуррентной нейронной сети, а также предложен один из способов решения этой проблемы.

2. ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА

Если в качестве весовых коэффициентов возьмем блоки усиления структурной схемы дискретного регулятора, то добьемся производительности на уровне дискретного регулятора.

Переходные процессы дискретного и нейросетевого регулятора идентичные (рис. 4).

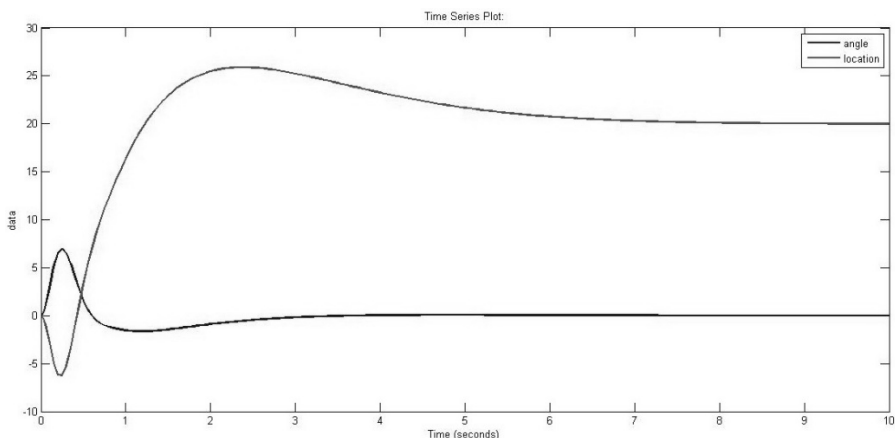


Рис. 4. Переходные процессы дискретного и нейросетевого регуляторов

Как показано в статье [12], для дальнейшей оптимизации производительности регулятора (а именно уменьшения уровня перерегулирования) нужно изменение обучающей выборки в сторону увеличения данных о статическом состоянии объекта и настройка весовых коэффициентов по этой обучающей выборке. Таким образом, приходим к выводу о том, что нам необходима настройка весовых коэффициентов.

При настройке рекуррентной нейросети средствами Matlab возникает проблема «исчезающих» или «взрывающихся» градиентов. Это приводит к приостановке процедуры обучения без достижения необходимого уровня производительности нейрорегулятора.

В качестве решения этой проблемы предлагается переход к сети прямого распространения (рис. 5). Выход нейронов из четвертого слоя, используемый для передачи значений в нейроны третьего слоя, предлагается перенаправить на выход регулятора (*Out1*, *Out2*). Вход в нейроны третьего слоя предлагается брать из вновь введенных входов регулятора (*Input1*, *Input2*). Таким образом, для каждой обратной связи из структуры, представленной на рис. 3, в преобразованной структуре на рис. 5 происходит добавление одного входа и одного выхода.

Структурная схема преобразованного нейрорегулятора будет выглядеть следующим образом (рис. 5).

Обратные связи выведены за пределы регулятора и будут учитываться в структуре «регулятор – объект».

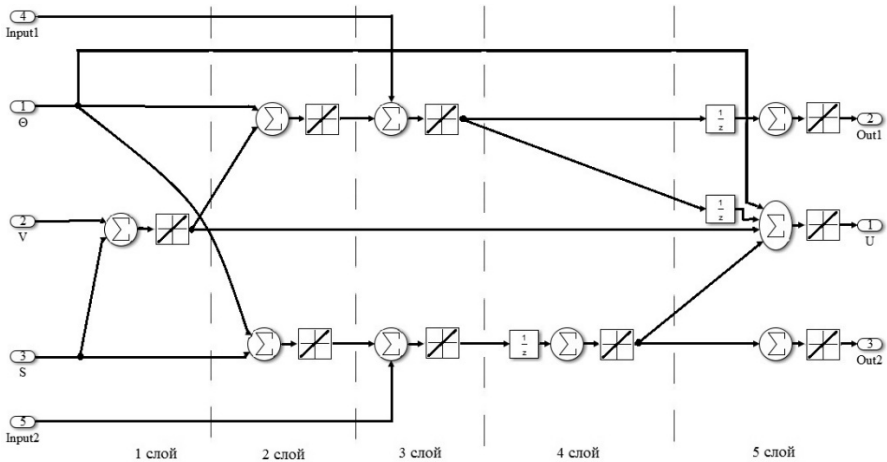


Рис. 5. Структурная схема преобразованного нейрорегулятора без обратных связей

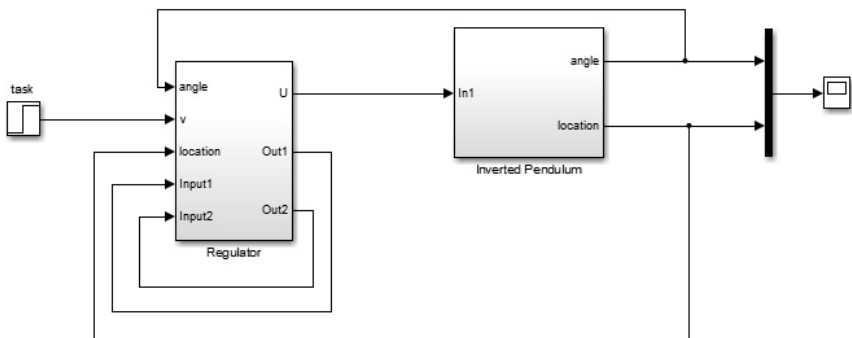


Рис. 6. Структурная схема «регулятор – объект» с обратными связями за пределами регулятора

Переходные процессы нейрорегулятора и преобразованного нейрорегулятора совпадают. Значит, структурные преобразования схемы не повлияли на его производительность. Однако в преобразованном варианте структурной схемы нейрорегулятора нет обратных связей, а значит, имеем дело с сетью прямого распространения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере системы «перевернутый маятник на тележке» осуществлено управление заданными параметрами с помощью классического и нейросетевого регуляторов.

Одна из причин, по которой сделан выбор в сторону нейросетевого регулирования, связана со способностью оптимизации его производительности по сравнению с классическим регулятором (например, в сторону уменьшения перерегулирования системы).

Для увеличения производительности регулятора с применением нейронной сети необходимо ее дообучение. Однако при обучении нейрорегулятора возникают сложности в связи с наличием обратных связей в ее структуре. Значения градиента принимают либо слишком большие, либо слишком малые.

В настоящей статье был показан один из способов перехода от рекуррентной архитектуры сети к структуре прямого распространения (т. е. не содержащей обратные связи). Это преобразование позволяет применять методы оптимизации, основанные на градиентном спуске.

В дальнейших работах планируется рассмотреть нелинейную структуру объекта «перевернутый маятник на тележке» и попытаться применить для ее управления регулятор с использованием нейронной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J.* Learning representations by back-propagating errors // *Nature*. – 1986. – Vol. 323 (6088). – P. 533–536.
2. *Elman J.* Finding structure in time // *Cognitive Science*. – 1990. – Vol. 14 (2). – P. 179–211.
3. *Werbos P.J.* Generalization of backpropagation with application to a recurrent gas market model // *Neural Networks*. – 1988. – Vol. 1 (4). – P. 339–356.
4. *Bengio Y., Simard P., Frasconi P.* Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult // *IEEE Transactions on Neural Networks*. – 1994. – Vol. 5 (2). – P. 157–166.
5. *Pascanu R., Mikolov T., Bengio Y.* On the difficulty of training Recurrent Neural Networks. – URL: <https://arxiv.org/abs/1211.5063> (accessed: 10.03.2021).
6. *Arjovsky M., Shah A., Bengio Y.* Unitary evolution Recurrent Neural Networks. – URL: <https://arxiv.org/abs/1511.06464> (accessed: 10.03.2021).
7. *Doya K.* Bifurcations of recurrent neural networks in gradient descent learning // *IEEE Transactions on Neural Networks*. – 1993. – Vol. 1. – P. 75–80.

8. *Werbos P.J.* Generalization of backpropagation with application to a recurrent gas market model // *Neural Networks*. – 1988. – Vol. 1 (4). – P. 339–356.

9. Документация к программному продукту Matlab. – URL: https://docs.exponenta.ru/matlab/matlab_prog/infinity-and-nan.html (дата обращения: 10.03.2021).

10. *Воевода А.А., Шоба Е.В.* Управление перевернутым маятником // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 2 (68). – С. 3–14.

11. *Шипагин В.И.* Различные подходы к решению задачи перевернутого маятника // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 2 (95). – С. 18–27. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-18-27.

12. *Шипагин В.И.* Нейросетевая реализация регулятора для устойчивого объекта // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 53–63. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-53-63.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 300 публикаций. E-mail: uscit@uscit.ru.

Шипагин Виктор Игоревич, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. E-mail: shipagin@mail.ru.

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-7-16

Structural transformations of a neural network controller with a recurrent network type*

A.A. Voevoda¹, V.I. Shipagin²

¹*Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: ucit@ucit.ru*

²*Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student of Department "Automatics". E-mail: shipagin@mail.ru*

The complexity of the objects of regulation, as well as the increase in the requirements for the productivity of the applied regulators, leads to the complexity of the applied neural network regulators. One of the complications is the appearance of feedback loops in the regulator. That is, the transition from direct distribution networks to recurrent ones. One of the problems when using them is setting up weight coefficients using methods based on gradient calculation (for example, the error propagation method, the Levenberg-Marquardt method, etc.). It manifests itself in a suddenly "disappearing" or "exploding" gradient, which means that the learning process of the network stops.

The purpose of this article is to develop proposals for solving some problems of configuring the weight coefficients of a recurrent neural network.

As methods for achieving this goal, structural transformations of the architecture of a recurrent neural network are used to bring it to the form of a direct distribution network. At the same time, there is a slight increase in the complexity of its architecture. For networks of direct distribution methods based on the computation of the inverse gradient can be used without modification.

In the future, it is planned to increase the performance of regulating the system with the help of a converted neuro-regulator, namely, to reduce the over-regulation of the system and, after some complications of the structure, use it to regulate a nonlinear object.

Keywords: neuroregulator, control system, multi-channel system, neural network architecture, recurrent neural networks, neural network training, structural pre-formations of the neuroregulator

REFERENCES

1. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 1986, vol. 323 (6088), pp. 533–536.
2. Elman J. Finding structure in time. *Cognitive Science*, 1990, vol. 14 (2), pp. 179–211.
3. Werbos P.J. Generalization of backpropagation with application to a recurrent gas market model. *Neural Networks*, 1988, vol. 1 (4), pp. 339–356.
4. Bengio Y., Simard P., Frasconi P. Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1994, vol. 5 (2), pp. 157–166.

* Received 01 September 2020.

5. Pascanu R., Mikolov T., Bengio Y. *On the difficulty of training Recurrent Neural Networks*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1211.5063> (accessed 10.03.2021).
6. Arjovsky M., Shah A., Bengio Y. Unitary evolution Recurrent Neural Networks. Available at: <https://arxiv.org/abs/1511.06464> (accessed 10.03.2021).
7. Doya K. Bifurcations of recurrent neural networks in gradient descent learning. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1993, vol. 1, pp. 75–80.
8. Werbos P.J. Generalization of backpropagation with application to a recurrent gas market model. *Neural Networks*, 1988, vol. 1 (4), pp. 339–356.
9. *Dokumentatsiya k programmnomu produktu Matlab* [Documentation for the software product Matlab]. Available at: https://docs.exponenta.ru/matlab/matlab_prog/infinity-and-nan.html (accessed 10.03.2021).
10. Voevoda A.A., Shoba E.V. Upravlenie perevernutym mayatnikom [Management of the inverted pendulum]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 2 (68), pp. 3–14.
11. Shipagin V.I. Razlichnye podkhody k resheniyu zadachi perevernutogo mayatnika [Different approaches to solving the inverted pendulum problem]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (95), pp. 18–27. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-18-27.
12. Shipagin V.I. Neurosetevaya realizatsiya regulyatora dlya ustoichivogo ob"ekta [Neural network implementation of a controller for a stable object]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 53–63. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-53-63.

Для цитирования:

Воевода А.А., Шипагин В.И. Структурные преобразования нейросетевого регулятора с рекуррентным типом сети // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 3 (98). – С. 7–16. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-7-16.

For citation:

Voevoda A.A., Shipagin V.I. Strukturnye preobrazovaniya neurosetevogo regulyatora s rekurrentnym tipom seti [Structural transformations of a neural network controller with a recurrent network type]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 3 (98), pp. 7–16. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-7-16.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 548.58:549.211

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-17-29

**ОСОБЕННОСТИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ
МЕТАЛЛ-АЛМАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ***

И.А. ИШУТИН¹, А.А. ЧЕПУРОВ², Е.И. ЖИМУЛЕВ³

¹ 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Институт геологии и минералогии им В.С. Соболева СО РАН, инженер-исследователь. E-mail: ilya.ishutin.96@mail.ru

² 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Институт геологии и минералогии им В.С. Соболева СО РАН, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник. E-mail: achipurov@igm.nsc.ru

³ 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Институт геологии и минералогии им В.С. Соболева СО РАН, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник. E-mail: ezhimulev@igm.nsc.ru

В представленной работе были получены композиты путем спекания металл-алмазной шихты при давлении 4 ГПа и температуре 1300 °С. Эксперименты были проведены на аппарате высокого давления типа разрезная сфера «БАРС». В качестве алмаза были использованы синтетические микрокристаллы промышленного синтеза. Исходной металлической составляющей для экспериментов были медь и железо. Было показано, что при спекании при высоком давлении кристаллы алмаза оказываются плотно упакованы в композите, при этом металлическая фаза полностью заполняла межзерновое пространство, выполняя роль матрицы. Химический анализ металлической составляющей образцов выявил присутствие следующих фаз: сплав меди с железом, оксид железа и карбид железа. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о протекании в системе алмаз–медь–железо при высоком давлении и температуре одновременно нескольких процессов, обусловленных присутствием металлического Fe, которые могут существенно повлиять на характеристики получаемого композита в целом.

Ключевые слова: алмаз, медь, железо, композит, высокое давление

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время уделяется много внимания исследованиям, направленным на получение композитов на основе алмаза. Такие композиты, например, представляют интерес в качестве теплоотводящих элементов бла-

* Статья получена 10 сентября 2020 г.

годаря высокой теплопроводности алмаза (до 2000 Вт/мК) [1]. При этом алмаз уже давно применяется в лазерных системах в виде теплоотводящих монокристалльных пластин. В экспериментальных работах, посвященных получению высокотеплопроводных композитов, чаще всего использовалась смесь алмазных микрокристаллов и металлов, таких как Cu, Al, Ag [2]. Однако существует ряд проблем, которые пока ограничивают получение высококачественных композитов. Так, слабое смачивание алмаза металлами, которые не относятся к группе переходных, является одним из главных препятствий для создания прочных композитов и более глубокого продвижения в этой теме. Касаясь вопроса о том, какие именно алмазы применялись для получения металл-алмазных композитов, большинство исследователей в мире чаще всего обращаются именно к синтетическим алмазным микропорошкам, получаемым методом синтеза при высоком давлении (НРНТ) [3], так как этот продукт в последние два десятилетия стал доступен на мировом рынке. Один из подходов, который позволяет получить высокопрочный металл-алмазный композит, который при этом может демонстрировать высокие значения теплопроводности, состоит в использовании техники высокого давления [4–6]. Цель представленной работы – изучение внутреннего строения композитов, полученных при высоком давлении спеканием микропорошка алмаза с металлами Cu и Fe.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проведены на многопуансонном аппарате высокого давления типа «разрезная сфера» (БАРС) в ИГМ СО РАН [7]. Ячейка высокого давления (ЯВД) изготавливалась из тугоплавких оксидов ZrO_2 , CaO и MgO с трубчатым графитовым нагревателем диаметром 11 мм. Передача электротока на нагреватель осуществлялась через молибденовые контакты. Схема сборки реакционного объема ячейки высокого давления приведена на рис. 1. От нагревателя образец изолировали втулкой из MgO. Образцом служила смесь микрокристаллов синтетического алмаза, порошка Cu и Fe, которую засыпали внутрь втулки. Алмазы представляли собой кубооктаэдрические микрокристаллы преимущественно без включений и трещин размерной группы 200...300 мкм.

Эксперименты были проведены при давлении 4 ГПа при температуре 1300 °С. Режим опытов был следующим: подъем давления, нагрев исследуемого образца, выдержка в течение 10 минут при заданных P – T параметрах, и быстрое охлаждение. Время закалки составляло 2–3 с, что обусловлено эффективным водяным охлаждением внутренней ступени многопуансонного

аппарата БАРС. По известному положению линии равновесия графит–алмаз в P – T -координатах [8] вносили поправку на увеличение давления при последующем нагревании. Температуру в ЯВД измеряли с помощью платиновородиевой термопары. Погрешность определения давления в опытах оценивали в ± 0.25 ГПа, температуры – в ± 25 °С. Особенности конструкции аппарата и проведения опытов более детально описаны в ранних работах [9, 10].

Образцы после экспериментов изучали при небольшом увеличении под оптическим бинокляром МБС-10. Микрофотографирование осуществляли с помощью микроскопа МС2-Zoom с фотонасадкой и фотоаппаратом Canon EOS 1000. Для оценки структуры образцов была использована растровая электронная микроскопия. Химический анализ металлической фазы в образцах был выполнен на приборе JEOL JXA-8530F, оборудованном спектрометрами с дисперсией по длине волны и энергии (WDS и EDS).

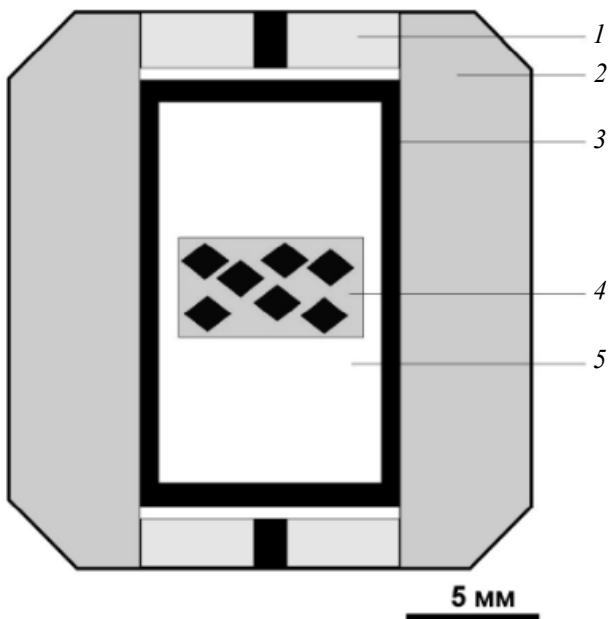


Рис. 1. Схема сборки ячейки высокого давления для проведения экспериментов:

1 – торцевая шайба с электрическим контактом; 2 – контейнер; 3 – графитовый нагреватель; 4 – образец, синтетические микроалмазы в Cu–Fe матрице; 5 – изолирующая втулка

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов были получены образцы металл-алмазных композитов в виде шайб диаметром 8 мм. В композите зерна алмаза находились в тесном контакте с соседними алмазами, а металлическая фаза заполняла межзерновое пространство между кристаллами, формируя своеобразный «цемент». Стоит отметить, что в изучаемых образцах можно наблюдать участки, где отсутствует металлическая фаза и присутствует контакт соседних зерен алмаза, которые буквально «срастаются» друг с другом. На поверхности кристаллов алмаза в композите присутствия графита не наблюдали.

С одной стороны, можно наблюдать (рис. 2), что граница контакта между алмазом и металлом в большинстве случаев очень четкая. Это может свидетельствовать о том, что металлический сплав в этих участках не смачивал алмаз, и удержание кристаллов в композите осуществляется в значительной степени за счет металлического каркаса. С другой стороны, в образцах нередко наблюдаются участки, где четко видно обволакивание кристаллов алмаза металлической фазой, что указывает на хорошее смачивание кристаллов алмаза металлическим расплавом.

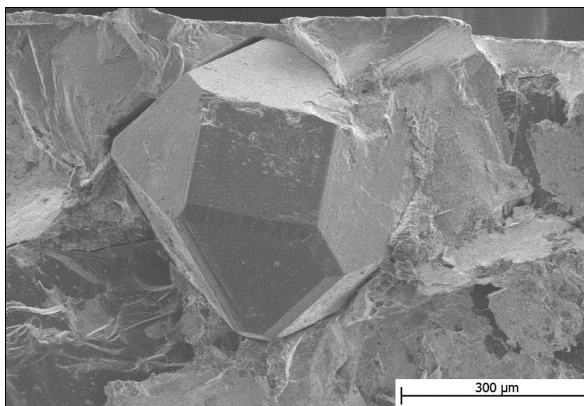


Рис. 2. Кристалл алмаза кубооктаэдрического габитуса в металлической матрице

После вскрытия композитов и извлечения алмазов было обнаружено, что в местах отпечатков граней кристаллов алмаза металл имеет неоднородную окраску, а именно: хорошо видны темные пятна (рис. 3). Более детальное микроскопическое изучение этих участков показало, что темные пятна пред-

ставляют собой тончайшие корочки, обособленно присутствующие на поверхности основной массы металла.

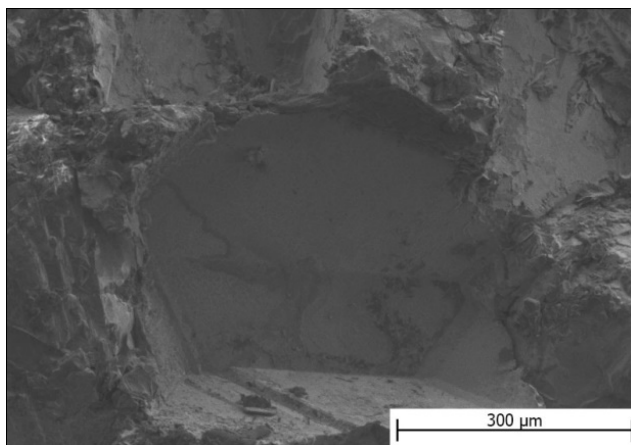


Рис. 3. Отпечаток грани кристалла алмаза в металлической матрице. На поверхности металла наблюдаются темные пятна неправильной формы

При детальном изучении металлической составляющей композитов в виде шлифованных образцов было выявлено, что металл в объеме имеет неоднородное строение. Вдоль границы контакта кристаллов алмаза в металле наблюдаются главным образом включения преимущественно округлой формы, имеющие резкие границы с основной массой металла и отличающиеся по цвету от основной массы (рис. 4).

Химический анализ металлической составляющей образцов после извлечения алмазов выявил присутствие следующих фаз: сплав Cu и Fe, оксид железа и карбид железа. Представительные анализы образцов приведены в таблице. В данном случае (рис. 4) светло-серая фаза представляет собой однородный сплав Cu–Fe, который заполняет большую часть пространства. Примечательно, что этот сплав содержит 1,34...2,86 мас. % Fe. Темные включения представляют собой оксид Fe с примесью около 3 мас. % Cu. Идентифицированный в образцах сплав Fe–Cu содержит всего 2,72...6,31 мас. % Cu. Он представлен в подчиненном количестве в виде узких каемок светло-серого цвета с неявными границами вокруг темно-серых включений оксида железа. Повсеместно обнаруженный в образцах карбид железа (рис. 5) находится преимущественно вдоль границ с алмазными зернами. Выделения карбида характеризует специфическая структура. В данном случае карбид формирует свое-

образные ячейки, промежутки между которыми заполнены тончайшей сетью сплава Cu–Fe.

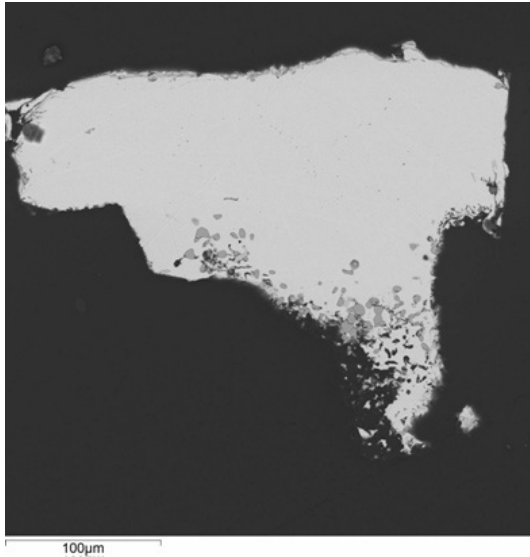


Рис. 4. Микрофотография (РЭМ) металлической составляющей композита после извлечения кристаллов алмаза. Многочисленные темно-серые включения вдоль границы металла – оксид Fe. Снимок сделан с использованием детектора обратно-рассеянных электронов

Представительные химические анализы металлических образцов композитов

Номер анализа	Компонент, мас. %					Фаза
	Cu	Fe	O	C	Сумма	
1	2.43	75.93	22.01	0	100.38	Оксид Fe
2	2.81	75.40	22.79	0	100.01	
3	2.91	75.89	21.46	0	100.26	
4	4.91	74.07	21.51	0	100.49	
5	3.08	75.05	22.71	0	100.85	
6	2.55	75.45	22.12	0	100.11	
7	2.56	75.31	22.47	0	100.35	
8	2.22	75.03	22.64	0	99.89	

Окончание таблицы

Номер анализа	Компонент, мас. %					Фаза
	Cu	Fe	O	C	Сумма	
9	3.33	74.17	22.68	0	100.18	
10	2.59	74.79	22.63	0	100.01	
1	3.33	96.38	0	0	99.71	Сплав Fe–Cu
2	3.36	97.03	0	0	100.38	
3	6.31	93.17	0	0	99.48	
4	4.33	95.74	0	0	100.07	
5	2.72	96.86	0	0	99.58	
6	2.68	96.59	0	0	99.27	
7	4.91	94.16	0	0	99.07	
8	4.49	95.51	0	0	100.00	
9	6.27	93.69	0	0	99.78	
10	3.80	96.49	0	0	100.30	
1	96.25	2.86	0.78	0	99.89	
2	97.69	1.89	0.70	0	100.27	
3	98.19	1.42	0.74	0	100.34	
4	97.88	1.61	0.61	0	100.10	
5	96.80	2.45	0	0	99.25	
6	97.42	2.40	0	0	99.82	
7	97.37	2.08	0	0	99.45	
8	97.08	1.77	0	0	98.86	
9	97.08	2.02	0	0	99.09	
10	97.74	2.11	0	0	99.84	
11	97.01	1.34	0	0	98.35	
1	1.00	90.09	0	*	91.09	Карбид Fe
2	5.82	89.55	0	*	95.59	
3	3.59	88.56	0	*	92.32	
4	3.26	88.84	0	*	92.32	
5	2.24	90.02	0	*	92.45	

Примечание. Углерод исключен из таблицы составов ввиду напыления образцов для анализа углеродом.

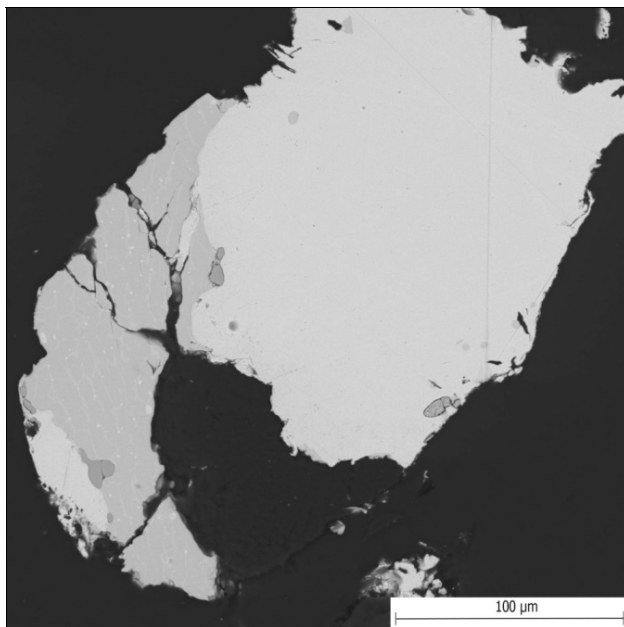


Рис. 5. Микрофотография (РЭМ) участка металлической матрицы композита после спекания при высоком давлении: светло-серая фаза – сплав Cu–Fe, более темно-серая фаза слева – карбид Fe; отдельные темно-серые округлые выделения – оксид Fe. Снимок сделан с использованием детектора обратно-рассеянных электронов

Проведенное исследование указывает на то, что значительная часть железа, введенного в систему в виде микропорошка Fe, в ходе эксперимента превратилась в оксид железа, темные микровключения которого повсеместно замечены на микрофотографиях. Такой эффект связан, вероятнее всего, с остаточным кислородом воздуха и парами воды, которые присутствуют при сборке ячейки перед опытом. При этом окисление железа означает его невозможность взаимодействовать с алмазом и растворять углерод. Скорее всего, именно по этой причине кристаллы алмаза в наших экспериментах во многих участках своей поверхности практически не имели признаков травления. Тем не менее наблюдаемое травление кристаллов алмаза всё же было обеспечено некоторой частью неокисленного железа, которое мы обнаруживаем в виде карбида, а также той части железа, которая в итоге растворилась в расплаве Cu. Уместно отметить, что наблюдаемые в отпечатках алмазов в метал-

ле темные корочки (рис. 3), очевидно, являются смесью окисленной формы и карбида Fe. Обнаруженный в продуктах опытов карбид железа, вероятнее всего, представлен Fe_3C . Он является типичной фазой, образующейся в системе Fe–C при охлаждении ниже P – T -параметров экспериментов. Очень тесное расположение как карбида, так и оксида железа, наблюдаемое в локальных участках, равно как и присутствие в этих участках расплава меди с железом, свидетельствует о том, что в ходе экспериментов имели место несколько процессов: окисление частиц железа, растворение частицами железа части углерода алмаза, а также растворение частиц железа в расплаве меди.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при давлении 4 ГПа и температуре 1300 °С были получены металл-алмазные композиты, имеющие высокую плотность упаковки кристаллов алмаза в металлической матрице, что соответствует ранее сообщавшимся экспериментам при высоких давлениях [4]. В результате исследования металлической составляющей образцов было выяснено, что часть железа, введенного в систему в виде микропорошка Fe, в ходе эксперимента превратилась в оксид Fe. Это, вероятнее всего, связано с остаточным кислородом воздуха и парами воды, которые проникают в сборку ячейки при подготовке эксперимента. При этом можно утверждать, что существенная часть Fe участвовала в реакции взаимодействия с поверхностью кристаллов алмаза – это подтверждается присутствием карбида Fe в образцах вдоль границ алмаз-металл. Взаимодействие Fe и углерода алмаза неизбежно отражается и на изменении поверхности кристаллов [11], которое приводит к обнаруженному в образцах эффекту увеличения смачивания поверхности кристаллов алмаза металлом. Такие данные указывают на возможность получения данным способом композита с высокими прочностными характеристиками. В ходе исследования микроструктуры металлической части образцов было также определено, что часть Fe реагировала с расплавом Cu, что подтверждается обнаружением сплава, структура которого может приобрести значительную неоднородность. Такая особенность была отмечена ранее в опытах с большим содержанием Fe [12]. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о протекании в системе алмаз–медь–железо при высоком давлении и температуре одновременно нескольких процессов, обусловленных присутствием металлического Fe, которые могут существенно повлиять на структуру металлической составляющей композита. Это следует учитывать при разработке подходов к получению металл-алмазных композитов на основе меди с добавлением в систему железа.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН № 0330-2019-0012. Микрофотографирование кристаллов алмаза было проведено с использованием оборудования ЦКП «Наноструктуры».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Field E.J.* The properties of natural and synthetic diamonds. – London: Academic Press, 1992. – 350 p.
2. *Kidalov S.V., Shakhov F.M.* Thermal conductivity of diamond composites // *Materials*. – 2009. – Vol. 2. – P. 2467–2495.
3. *Weber L., Tavangar R.* Diamond-based metal matrix composites for thermal management made by liquid metal infiltration-potential and limits // *Advanced Materials Research*. – 2009. – Vol. 59. – P. 111–115.
4. *Yoshida K., Morigami H.* Thermal properties of diamond/copper composite material // *Microelectronics Reliability*. – 2004. – Vol. 44. – P. 303–308.
5. Влияние микроструктуры и размера зерна на теплопроводность алмазных композитов, полученных при высоких давлениях / Е.А. Екимов, Н.В. Суэтин, А.Ф. Попович, В.Г. Ральченко, Е.Л. Громницкая, В.П. Моденов // *Неорганические материалы*. – 2008. – Т. 44, № 3. – С. 275–281.
6. *Екимов Е.А., Зотеев А., Боровиков Н.Ф.* Спекание наночастиц алмаза в присутствии кобальта // *Неорганические материалы*. – 2009. – Т. 45, № 5. – С. 545–548.
7. A new type of “Split Sphere” apparatus / I.Y. Malinovsky, Ya.I. Shurin, E.N. Ran, A.A. Godovikov, A.A. Kalinin, A.M. Doroshev // *DELP International Symposium and the Second Japan–USSR Symposium*. – Misasa, Japan, 1989.
8. *Kennedy C.S., Kennedy G.C.* The equilibrium boundary between graphite and diamond // *Journal of Geophysical Research*. – 1976. – Vol. 81 (14). – P. 2467–2470.
9. The synthesis of methane and heavier hydrocarbons in the system graphite-iron-serpentine at 2 and 4 GPa and 1200°C / A.A. Tomilenko, A.I. Chepurov, V.M. Sonin, T.A. Bul’bak, E.I. Zhimulev, A.A. Chepurov, T.Yu. Timina, N.P. Pokhilenko // *High Temperatures-High Pressures*. – 2015. – Vol. 44, N 6. – P. 451–465.
10. *Tonkov E.Yu., Ponyatovsky E.G.* Phase transformations of elements under high pressure. – Boca Raton: CRC Press, 2004. – 392 p.
11. *Sonin V.M., Chepurov A.I., Fedorov I.I.* The action of iron particles at catalyzed hydrogenation of {100} and {110} faces of synthetic diamond // *Diamond and Related Materials*. – 2003. – Vol. 12. – P. 1559–1562.

12. Zhang J., Cui X., Wang Y. Liquid phase separation in immiscible Cu–Fe alloys // International Journal of Cast Metals Research. – 2017. – Vol. 31 (2). – P. 87–92.

Ишутин Илья Андреевич, инженер-исследователь Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: ilya.ishutin.96@mail.ru

Чепуров Алексей Анатольевич, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: achipurov@igm.nsc.ru

Жимулев Егор Игоревич, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: ezhimulev@igm.nsc.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-17-29

Features of the internal structure of high-pressure metal-diamond composites*

I.A. Ishutin¹, A.A. Chepurov², E.I. Zhimulev³

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Koptyuga Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, Research Engineer IGM SB RAS. E-mail: ilya.ishutin.96@mail.ru

² V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Koptyuga Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, PhD, PhD, IGM SB RAS. E-mail: achipurov@igm.nsc.ru

³ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Koptyuga Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, PhD, PhD, IGM SB RAS. E-mail: ezhimulev@igm.nsc.ru

In the present work, composites were obtained by sintering a metal-diamond charge at a pressure of 4 gpa and a temperature of 1300°C. the experiments were carried out on a high-pressure apparatus of the split sphere “bars” type. Synthetic microcrystals of industrial synthesis were used as a diamond. The initial metal component for the experiments was copper and iron. it was shown that when sintering at high pressure, diamond crystals are tightly packed in the composite, while the metal phase completely fills the intergranular space, acting as a matrix. chemical analysis of the metal component of the samples revealed the presence of the following phases: copper-iron alloy, iron oxide and iron carbide. the results obtained indicate that

* Received 10 September 2020.

several processes occur simultaneously in the diamond-copper-iron-oxygen system at high pressures and temperatures, which can significantly affect the characteristics of the resulting composite as a whole.

Keywords: diamond, copper, iron, composite, high pressure

REFERENCES

1. Field E.J. *The properties of natural and synthetic diamonds*. London, Academic Press, 1992. 350 p.
2. Kidalov S.V., Shakhov F.M. Thermal conductivity of diamond composites. *Materials*, 2009, vol. 2, pp. 2467–2495.
3. Weber L., Tavangar R. Diamond-based metal matrix composites for thermal management made by liquid metal infiltration-potential and limits. *Advanced Materials Research*, 2009, vol. 59, pp. 111–115.
4. Yoshida K., Morigami H. Thermal properties of diamond/copper composite material // *Microelectronics Reliability*. – 2004. – Vol. 44. – P. 303–308.
5. Ekimov E.A., Suetin N.V., Popovich A.F., Ralchenko V.G., Gromnitskaya E.L., Modenov V.P. Vliyanie mikrostruktury i razmera zerna na teploprovodnost' almaznykh kompozitov, poluchennykh pri vysokikh davleniyakh [Influence of microstructure and grain size on thermal conductivity of diamond composites obtained at high pressures]. *Neorganicheskie materialy = Inorganic Materials*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 275–281.
6. Ekimov E.A., Zoteev A., Borovikov N.F. Spekanie nanochastits almaza v prisutstvii kobal'ta [Sintering of diamond nanoparticles in the presence of cobalt]. *Neorganicheskie materialy = Inorganic Materials*, 2009, vol. 45, no. 5, pp. 545–548.
7. Malinovsky I.Y., Shurin Ya.I., Ran E.N., Godovikov A.A., Kalinin A.A., Doroshev A.M. A new type of “Split Sphere” apparatus. *DELP International Symposium and the Second Japan–USSR Symposium*, Misasa, Japan, 1989.
8. Kennedy C.S., Kennedy G.C. The equilibrium boundary between graphite and diamond. *Journal of Geophysical Research*, 1976, vol. 81 (14), pp. 2467–2470.
9. Tomilenko A.A., Chepurov A.I., Sonin V.M., Bul'bak T.A., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., Timina T.Yu., Pokhilenko N.P. The synthesis of methane and heavier hydrocarbons in the system graphite-iron-serpentine at 2 and 4 GPa and 1200°C. *High Temperatures-High Pressures*, 2015, vol. 44, no. 6, pp. 451–465.
10. Tonkov E.Yu., Ponyatovsky E.G. *Phase transformations of elements under high pressure*. Boca Raton, CRC Press, 2004. 392 p.
11. Sonin V.M., Chepurov A.I., Fedorov I.I. The action of iron particles at catalyzed hydrogenation of {100} and {110} faces of synthetic diamond. *Diamond and Related Materials*, 2003, vol. 12, pp. 1559–1562.

12. Zhang J., Cui X., Wang Y. Liquid phase separation in immiscible Cu–Fe alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 2017, vol. 31 (2), pp. 87–92.

Для цитирования:

Ишутин И.А., Чепуров А.А., Жимулев Е.И. Особенности внутренней структуры металл-алмазных композитов, полученных при высоком давлении // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 3 (98). – С. 17–29. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-17-29.

For citation:

Ishutin I.A., Chepurov A.A., Zhimulev E.I. Osobennosti vnutrennei struktury metallalmaznykh kompozitov, poluchennykh pri vysokom davlenii [Features of the internal structure of high-pressure metal-diamond composites]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 3 (98), pp. 17–29. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-17-29.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ

УДК 621.7.044.7

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-30-38

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ КОЛЬЦЕВОГО ЛИСТОВОГО ОБРАЗЦА ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА*

К.Н. БОБИН¹, П.Н. БОБИН², В.В. ТОЛМАЧЁВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры самолето- и вертолетостроения. E-mail: bobin@corp.nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры самолето- и вертолетостроения. E-mail: bobinpn@mail.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, лаборант кафедры самолето- и вертолетостроения. E-mail: tolmachyov.2016@stud.nstu.ru

В работе моделировалось формообразование в контейнере эластичной средой кольцевого образца с отбортовками по внешнему и внутреннему контуру из алюминиевого сплава Д16АМ. Численное моделирование проводилось с использованием программного комплекса ANSYS в модуле explicit dynamics. Приведено описание особенностей моделирования квазистатической задачи формообразования эластичной средой листовой детали. Выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными в предыдущих исследованиях авторов. Подтверждена возможность использования модуля explicit dynamics программного комплекса ANSYS для моделирования формообразования эластичной средой листовых деталей. Расчеты потребного усилия прессы для штамповки эластичной средой кольцевого листового образца из сплава Д16АМ показали хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Ключевые слова: штамповка эластичной средой, метод конечных элементов, гибкая формовка, алюминиевые сплавы

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время метод штамповки эластичной средой нашел широкое применение в авиастроении. Таким методом изготавливается большая часть листовых деталей планера летательных аппаратов. Несмотря на наличие нор-

* Статья получена 04 августа 2020 г.

мативно-технической документации по выбору технологических режимов и достаточно большой производственный опыт по применению данной технологии, не всегда можно получить качественную деталь [1, 2]. Из-за этого случается брак деталей, а также увеличиваются затраты на материалы, трудозатраты и т. д.

Одним из решением обозначенной проблемы для новых, нестандартных деталей видится использование готовых программных пакетов инженерного анализа, позволяющих проводить моделирование формообразования для уточнения технологических режимов еще до изготовления реальных деталей [3]. Одним из таких пакетов является программа ANSYS.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Для оценки потребного усилия прессы с использованием программного комплекса ANSYS с модулем explicit dynamics проводилось моделирование формообразования эластичной средой кольцевого листового образца из сплава Д16АМ. На рис. 1 представлены геометрические размеры заготовки и получаемых деталей.

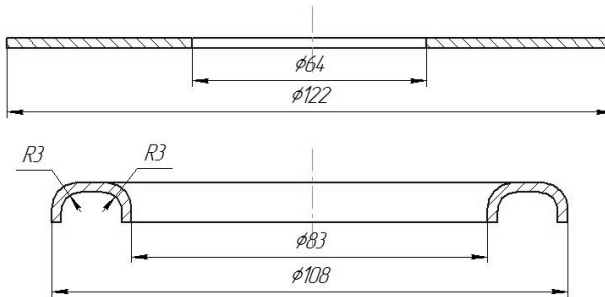


Рис. 1. Геометрические размеры заготовки и кольцевого образца

Расчетная область состояла из трех частей: заготовки, форм-блока и эластичной среды. Толщина заготовки составляла 1,5 мм, а высота штампуемого борта – 8 мм. В процессе моделирования использовалась 1/4 часть объемной модели с целью сокращения времени расчетов и лучшей визуализации результатов. Схема нагружения и схема расчетных областей показаны на рис. 2 и 3.

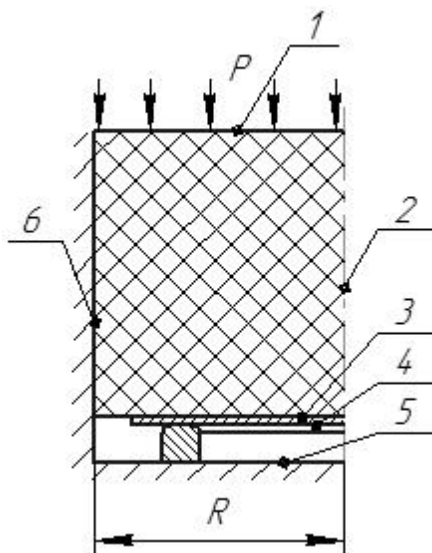


Рис. 2. Схема нагружения заготовки с форм-блоком в контейнере с эластичной средой: 1-6 – границы

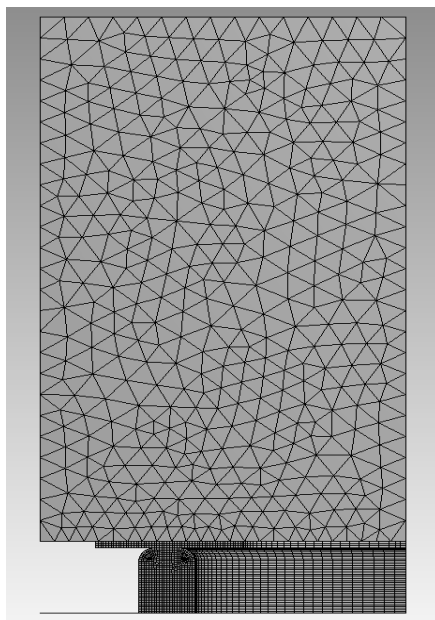


Рис. 3. Схема расчетных областей

Давление прессы в ходе моделирования задавалось через слой эластичной среды, что соответствует реальному формообразованию эластичной средой в замкнутом контейнере. Граница 2 служила осью симметрии. На границе эластичной среды и заготовки задавался контакт скольжения с трением с коэффициентом трения, равным 0,1. Форм-блок задавался как абсолютно жесткое тело. На границе заготовки и форм-блока задавался контакт скольжения с трением с коэффициентом трения, равным 0,05. Нижняя граница предназначалась для предотвращения проникновения материалов за расчетную область моделирования. Граница 6 выполняла функцию боковой стенки контейнера для эластичной среды. Расчетная область эластичной среды разбивалась автоматически на тетраэдральные ячейки. В зоне контакта эластичной среды и заготовки плотность ячеек задавалась вручную в два раза выше, чем в остальных местах. Расчетная область заготовки и форм-блока разбивалась также автоматически на ячейки в виде прямоугольных параллелепипедов, что увеличивает точность моделирования формообразования листовых деталей. Раз-

мер ячеек в радиальном сечении составлял $0,5 \times 0,5$ мм. Ячейки заготовки и форм-блока для предотвращения взаимного проникновения задавались одинакового размера. Общее количество конечных элементов модели составляло 71 442 единицы. Давление, создаваемое прессом в процессе моделирования, менялось от 15 МПа до 50 МПа.

Программный модуль explicit dynamics в основном предназначен для моделирования быстропротекающих процессов, поэтому для уменьшения времени счета формообразования эластичной средой применялся параметр mass scaling (массовое масштабирование) [4, 5].

Механические свойства материала заготовки соответствовали алюминиевому сплаву Д16АМ [6]. В качестве модели материала использовалась билинейно-упрочняемая модель.

Для описания поведения эластичной среды, изготовленной из полиуретана СКУ-7Л, использовалась модель Муни–Ривлина. Свойства полиуретана СКУ-7Л были взяты из работ [7, 8].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования формообразования эластичной средой кольцевого образца из сплава Д16АМ показаны на рис. 5 и 6.

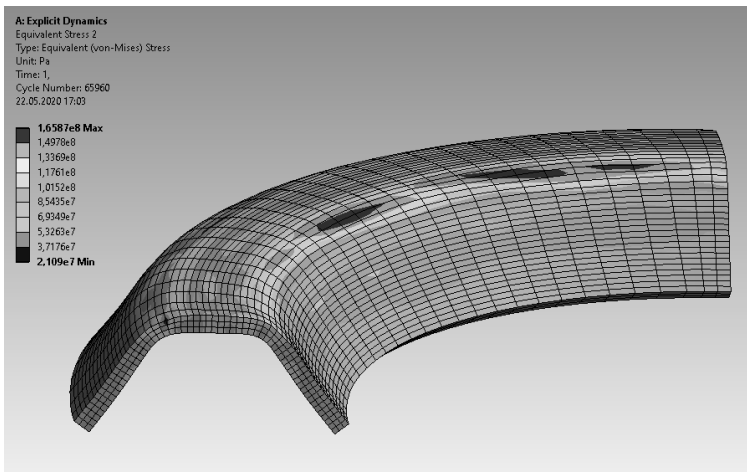


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние Д16АМ при давлении 15 МПа

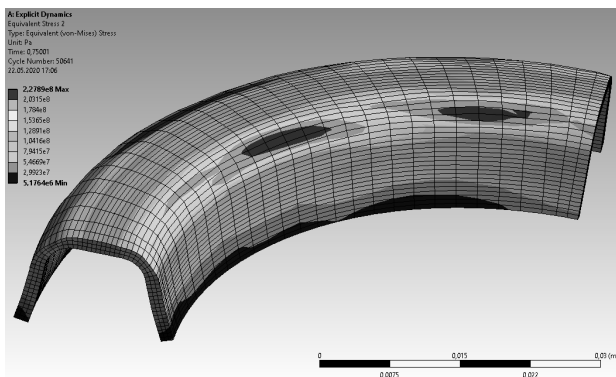


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние из сплава Д16АМ при давлении 25 МПа

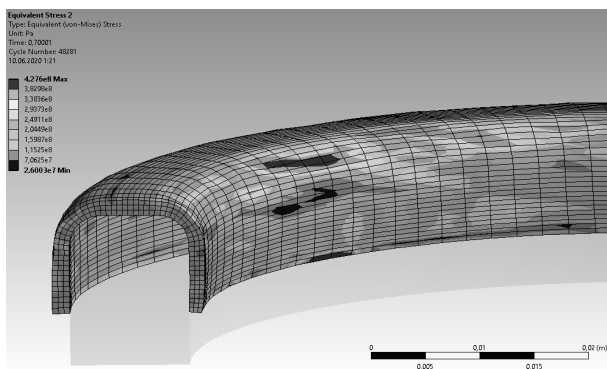


Рис. 6. Напряженно-деформированное состояние из сплава Д16АМ при давлении 32 МПа

С увеличением давления эластичной среды наблюдается предсказуемое увеличение углагиба заготовки. Полученные результаты моделирования формообразования эластичной средой кольцевых образцов были сравнены с экспериментальными данными, полученными в предыдущих исследованиях авторов [9]. Оптимальное давление для формообразования заготовки из Д16АМ при моделировании составило 32 МПа, а давление, полученное в реальном эксперименте, составляло 35 МПа. Полученная погрешность результатов моделирования и эксперимента составила $\sim 8\%$, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для моделирования формообразования эластичной средой возможно использовать модуль *explicit dynamics* программного комплекса ANSYS. Расчеты потребного усилия прессы для штамповки эластичной средой кольцевого листового образца из сплава Д16АМ показали хорошую сходимость с экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мироненко В.В.* Исследование процессов формообразования эластичной средой элемента типа «подсечка» на листовых заготовках подвижными элементами оснастки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Комсомольск-на-Амуре, 2020. – 23 с.

2. *Перцукова У.А., Воронков В.И.* Моделирование штамповки деталей из листового материала эластичной средой // Инженерные системы – 2016: труды Международного форума. – М.: МАКС Пресс, 2016. – С. 131–141.

3. *Мамутов В.С., Мамутов А.В.* Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки: учебное пособие / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – СПб., 2016. – 192 с.

4. *Тыняный А.* Использование ANSYS Explicit STR в задачах обработки металлов давлением. – URL: <https://sapr.ru/article/23197> (дата обращения: 11.03.2021).

5. Что такое массовое масштабирование, и когда его уместно применять для динамических расчетов в явной постановке? – URL: <https://www.ansys.com/soften.com.ua/about-ansys/blog/321-что-такое-массовое-масштабирование-и-когда-его-уместно-применять-для-динамических-расчетов-в-явной-постановке.html> (дата обращения: 11.03.2021).

6. Авиационные материалы: методические указания и рекомендации к выполнению курсовых работ и дипломных проектов для ФЛА всех специальностей / сост.: В.С. Белоусов, А.К. Карпец. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 31 с.

7. *Даева Н.Н.* Теоретические и экспериментальные исследования процессов разделения листового металла эластичными средами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 6. – С. 34–43.

8. *Семенов И.Е., Даева Н.Н.* Исследования процессов разделения тонколистового металла эластичными средами // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 2. – URL: <http://engineering-science.ru/doc/307360.html> (дата обращения: 11.03.2021).

9. *Бобин К.Н.* Уменьшение дефектов сплошности тонколистовых деталей летательных аппаратов магнитно-импульсной обработкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2011. – 17 с.

Бобин Константин Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры самолето- и вертолетостроения Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – импульсные методы обработки материалов. Имеет 12 публикаций. E-mail: bobin@corp.nstu.ru

Бобин Павел Николаевич, аспирант кафедры самолето- и вертолетостроения Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – импульсные методы обработки материалов. Имеет 4 публикации. E-mail: bobinpn@mail.ru

Толмачёв Виталий Владимирович, лаборант кафедры самолето- и вертолетостроения Новосибирского государственного технического университета. E-mail: tolmachyov.2016@stud.nstu.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-30-38

Modeling of formation ring sheet sample from aluminum alloy by elastic medium stamping*

K.N. Bobin¹, P.N. Bobin², V.V. Tolmachev³

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, doctor of Technical Sciences, associate professor of the Aircraft and helicopter construction department. E-mail: bobin@corp.nstu.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, postgraduate student of the Aircraft and helicopter construction department. E-mail: bobinpn@mail.ru*

³ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, laboratory assistant of the Aircraft and helicopter construction department. E-mail: tolmachyov.2016@stud.nstu.ru*

The forming process in tank with elastic structure of ring sheet sample from aluminum alloy D16AM with flanges on internal and external sides was modulated. The numerical modulation by using the module “explicit dynamics” of the “ANSYS” software package was performed. The features of modeling the quasi static problem of forming a sheet part by using the elastic medium was described. The simulation results are compared with experimental data obtained

* Received 04 August 2020.

in previous studies of the authors. The possibility of using the “explicit dynamics” module of the “ANSYS” software package for modeling the forming of sheet parts by an elastic medium has been confirmed. Calculations of the required press force for stamping ring sheet samples made of D16AM alloy with an elastic medium showed good convergence with experimental data.

Keywords: elastic medium stamping, finite element method, bending, aluminum alloys

REFERENCES

1. Mironenko V.V. *Issledovanie protsessov formoobrazovaniya elastichnoi sredoi elementa tipa "podsechka" na listovykh zagotovkakh podvizhnymi elementami osnastki*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Investigation of the processes of forming an elastic medium of the "slash" type element on sheet blanks by movable tooling elements. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Komsomolsk-on-Amur, 2020. 23 p.
2. Pertsukova U.A., Voronkov V.I. [Modeling of stamping parts made of sheet material with an elastic medium]. *Inzhenernye sistemy – 2016: trudy Mezhdunarodnogo foruma* [Engineering Systems – 2016: Proceedings of the International Forum]. Moscow, MAKS Press, 2016, pp. 131–141. (In Russian).
3. Mamutov V.S., Mamutov A.V. *Kompyuternoe modelirovanie protsessov listovoi shtampovki* [Computer modeling of sheet stamping processes]. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, 2016. 192 p.
4. Tynyanyi A. *Ispol'zovanie ANSYS Explicit STR v zadachakh obrabotki metallov davleniem* [Using ANSYS Explicit STR in metal forming tasks]. Available at: <https://sapr.ru/article/23197> (accessed 11.03.2021).
5. Chto takoe massovoe masshtabirovanie, i kogda ego umestno primenyat' dlya dinamicheskikh raschetov v yavnoi postanovke? [What is mass scaling, and when is it appropriate to use it for dynamic calculations in an explicit statement?]. Available at: <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/321-chto-takoe-massovoe-masshtabirovanie-i-kogda-ego-umestno-primenyat-dlya-dinamicheskikh-raschjotov-v-yavnoj-postanovke.html> (accessed 11.03.2021).
6. Belousov V.S., Karpets A.K., comp. *Aviatsionnye materialy* [Aviation materials]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2001. 31 p.
7. Daeva N.N. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya protsessov razdeleniya listovogo metalla elastichnymi sredami [Theoretical and experimental investigations of metal sheet cutting processes by elastic tools]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 6, pp. 34–43.
8. Semenov I.E. Daeva N.N. Issledovaniya protsessov razdeleniya tonkolistovogo metalla elastichnymi sredami [Studies of the processes of separation of

sheet metal by elastic media]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 2. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/307360.html> (accessed 11.03.2021).

9. Bobin K.N. *Umen'shenie defektov sploshnosti tonkolistovykh detalei letatel'nykh apparatov magnitno-impul'snoi obrabotkoi*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Reduction of defects in the continuity of thin-sheet parts of aircraft by magnetic pulse processing. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Krasnoyarsk, 2011. 17 p.

Для цитирования:

Бобин К.Н., Бобин П.Н., Толмачёв В.В. Моделирование формообразования эластичной средой кольцевого листового образца из алюминиевого сплава // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 3 (98). – С. 30–38. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-30-38.

For citation:

Bobin K.N., Bobin P.N., Tolmachev V.V. Modelirovanie formoobrazovaniya elastichnoi sredoi kol'tseвого листового образца iz alyuminievogo splava [Modeling of formation ring sheet sample from aluminum alloy by elastic medium stamping]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 3 (98), pp. 30–38. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-30-38.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ВНЕДРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В СРЕДЕ TCAD SENTAUROS*

М.А. КУЗНЕЦОВ¹, С.В. КАЛИНИН², А.С. ЧЕРКАЕВ³,
Д.И. ОСТЕРТАК⁴

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, лаборант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: kuznesov_aprel85@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: kalinin55@yandex.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: cherkaev@corp.nstu.ru

⁴ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, заведующий кафедрой полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: ostertak@ngs.ru

В настоящее время приложение SDevice пакета программ TCAD Sentaurus представляет собой надежное средство электрофизического моделирования кремниевых КМОП транзисторов, работающих в области температур $-60...+125$ °С. Для адаптации процесса моделирования к конкретным физическим условиям работы приборов в этом приложении имеется обширная библиотека моделей электрофизических параметров (в частности, моделей подвижностей или ширины запрещенной зоны). Однако при работе прибора в экстремальных криогенных условиях возникает потребность доработки этих моделей с помощью специального интерфейса Physical Model Interface (PMI). В работе представлены методические особенности работы с PMI и результаты внедрения пользовательских моделей параметров для кремниевых приборов.

Ключевые слова: TCAD Sentaurus, SDevice, Physical Model Interface, PMI, модель, подвижность

* Статья получена 20 сентября 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проектирование элементной базы кремниевых ИМС невозможно без высокоточного математического моделирования. Общеизвестным мировым стандартом для этой цели является САПР TCAD Sentaurus. Для расчета электрофизических характеристик и параметров транзисторов в этой среде используется приложение SDevice [1], в котором для эффективной работы пользователя при описании одного физического явления предоставляется целая библиотека его различных физических моделей. Пользователь при этом попадает в состояние «катастрофы от изобилия»: ему приходится выбирать одну конкретную модель из целого множества возможных. Однако при моделировании транзисторов, работающих в экстремальных условиях (например, в криогенном температурном диапазоне), в данный момент подходящей модели в библиотеке может вообще не существовать [2]. В данном случае пользователь должен самостоятельно выбирать модель из литературы или разрабатывать собственную модель на основе экспериментальных данных. Затем эту модель необходимо встроить в приложение SDevice с помощью специального инструмента – Physical Model Interface, PMI (интерфейс физических моделей).

Данный интерфейс позволяет использовать при вычислениях не встроенные в TCAD модели, а модели, написанные пользователем в виде программного кода. Интерфейс обеспечивает доступ ко всем важным для процесса электрофизического моделирования приборам моделям электрофизических процессов и параметров, среди которых процессы генерации-рекомбинации, подвижности носителей заряда, ширины запрещенной зоны и т. д. [1].

1. ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТЫ С ИНТЕРФЕЙСОМ

Методика работы с Physical Model Interface относительно проста. Для внедрения своей собственной модели в SDevice необходимо в соответствии с предлагаемым шаблоном [1] написать на языке программирования C++ подпрограмму, в которой будут описаны уравнения для расчета интересующей нас физической величины и ее производных. Затем с помощью встроенного компилятора создается объектный файл, который SDevice подгружает во время моделирования. В командном файле для SDevice при этом необходимо указать директорию и имя соответствующего объектного файла с внедряемой моделью.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. МЕТОДИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА ВСТРАИВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

На первом этапе исследования была проверена сама возможность внедрения собственных моделей. Для такой проверки была выбрана простейшая модель с постоянной подвижностью носителей заряда в кремнии. В модели были заданы величины подвижности электронов и дырок, равные $1500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $450 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ соответственно. На рис. 1 для сравнения показаны температурные зависимости подвижности электронов и дырок по модели Арора, встроенной в TCAD, и внедренной нами модели.

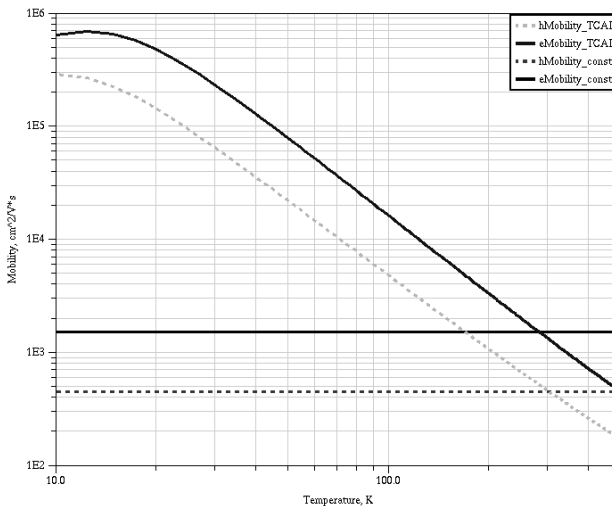


Рис. 1. График зависимости подвижности от температуры

На рис. 1 видно, что внедренная модель работает корректно и значения подвижности соответствуют заданным.

Далее была выполнена проверка расчета некоторых математических функций: линейной, логарифмической и экспоненциальной. Физической величиной, используемой для моделирования, в этом случае была условная ширина запрещенной зоны.

Из рис. 2 видно, что различные математические функции легко обрабатываются интерфейсом РМІ.

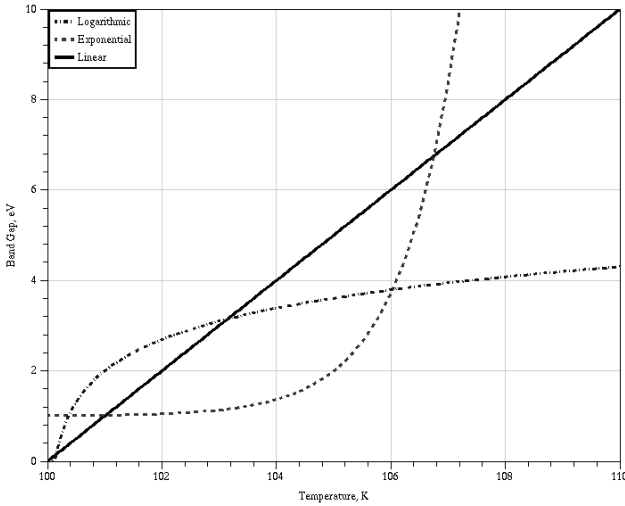


Рис. 2. Линейная, логарифмическая и экспоненциальная функции

2.2. ВНЕДРЕНИЕ МОДЕЛИ ДОРКЕЛА

Модель Доркела [3] была создана для расчета температурной зависимости подвижности кремния в широком диапазоне температур, включая верхнюю часть криогенного диапазона (от 77 до 120 К). Она содержит в себе несколько частей, описывающих различные механизмы рассеяния. Результирующая подвижность получается суммированием по правилу Маттиссена:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I}, \quad (1)$$

где μ_L – подвижность при рассеянии фононами, определяется формулой (2); μ_I – подвижность, зависящая от примеси, определяется формулой (3):

$$\mu_L(T) = \mu_L(300 \text{ К}) \left(\frac{T}{300 \text{ К}} \right)^{-\alpha}; \quad (2)$$

$$\mu_I = \frac{AT^{3/2}}{N} \left[\ln \left(1 + \frac{BT^2}{N} \right) - \frac{BT^2}{N + BT^2} \right]^{-1}. \quad (3)$$

В табл. 1 приведены значения параметров этой модели.

Таблица 1

Параметры для расчета модели Доркела

Параметр	электроны	дырки
$\mu_L(300\text{ K})$	$1430\text{ cm}^2\cdot\text{B}^{-1}\cdot\text{c}^{-1}$	$495\text{ cm}^2\cdot\text{B}^{-1}\cdot\text{c}^{-1}$
α	2.2	2.2
A	$4.61\cdot 10^{17}\text{ cm}^{-1}\cdot\text{B}^{-1}\cdot\text{c}^{-1}\cdot\text{K}^{-3/2}$	$1\cdot 10^{17}\text{ cm}^{-1}\cdot\text{B}^{-1}\cdot\text{c}^{-1}\cdot\text{K}^{-3/2}$
B	$1.52\cdot 10^{15}\text{ cm}^{-3}\cdot\text{K}^{-2}$	$6.25\cdot 10^{14}\text{ cm}^{-3}\cdot\text{K}^{-2}$

В TCAD Sentaurus при использовании нескольких моделей подвижностей, в том числе и внедренных, результирующая будет строиться по правилу Маттиссена. Получается, что одновременное использование формул (2) и (3) в вычислительном эксперименте даст такой же результат, что и использование формулы (1).

На рис. 3 представлены результаты расчетов двух моделей по формулам (2) и (3). Одновременное использование этих моделей, как уже отмечалось выше, дает такой же результат, как и модель, в которой описаны обе формулы. Результаты расчета для последней модели показаны на рис. 4.

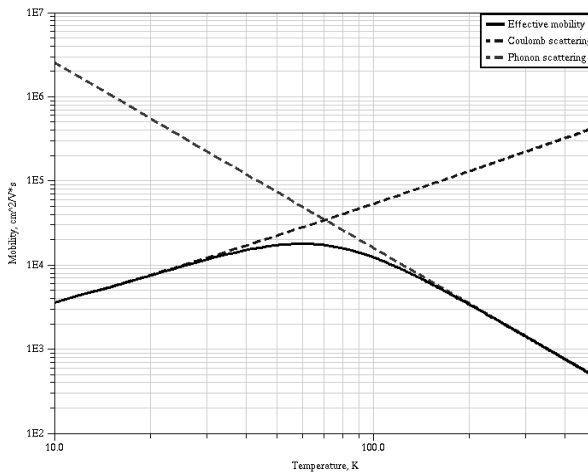


Рис. 3. График зависимости подвижности электронов от температуры. Пунктирные кривые – подвижность, обусловленная фоновым рассеянием (убывающая) и кулоновским рассеянием (возрастающая), рассчитанные по формулам (2) и (3) соответственно. Сплошная кривая – результат расчета с использованием обеих формул

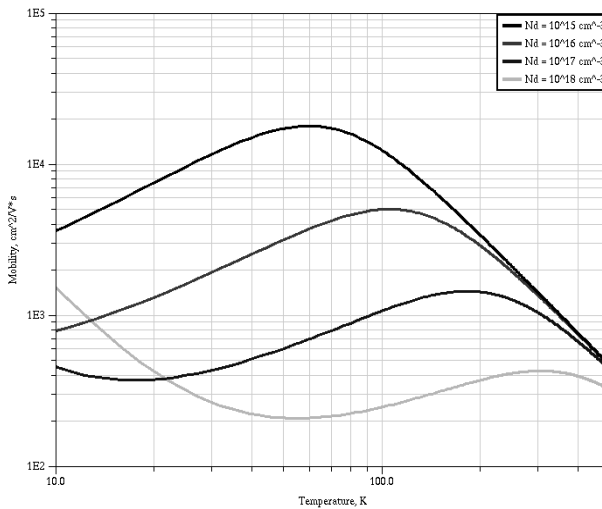


Рис. 4. Семейство кривых температурной зависимости подвижности, рассчитанных по модели Доркела, при различных концентрациях легирующей примеси

2.3. МОДЕЛИ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

Кроме модели подвижности Доркела нами были исследованы две модели ширины запрещенной зоны. Одна из них используется в программе PSPICE [4]. Расчет проводится по той же формуле, что и в TCAD Sentaurus, но с другими численными параметрами:

$$E_g = E_{g0} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}. \quad (4)$$

Таблица 2

Параметры для расчета ширины запрещенной зоны по формуле (4)

Параметр	TCAD Sentaurus [1]	PSPICE [4]
E_{g0}	1.1696 эВ	1.16 эВ
α	$4.7361 \cdot 10^{-4}$ эВ/К	$7.02 \cdot 10^{-4}$ эВ/К
β	636 К	1108 К

Другая модель описывает зависимость ширины запрещенной зоны с помощью полиномов [5]:

$$E_g = \begin{cases} 1.17 + 1.059 \cdot 10^{-5} T - 6.05 \cdot 10^{-7} T^2, & \text{если } T \leq 170 \text{ K;} \\ 1.1785 - 9.025 \cdot 10^{-5} T - 3.05 \cdot 10^{-7} T^2, & \text{если } 170 \text{ K} < T \leq 300 \text{ K;} \\ 1.206 - 2.73 \cdot 10^{-4} T, & \text{если } 300 \text{ K} < T. \end{cases} \quad (5)$$

В данной модели происходит разбиение области моделирования на три температурных интервала. Поэтому с внедрением этой модели была проверена возможность встраивания подобных выражений.

Результаты расчетов ширины запрещенной зоны по формуле (5) представлены на рис. 5.

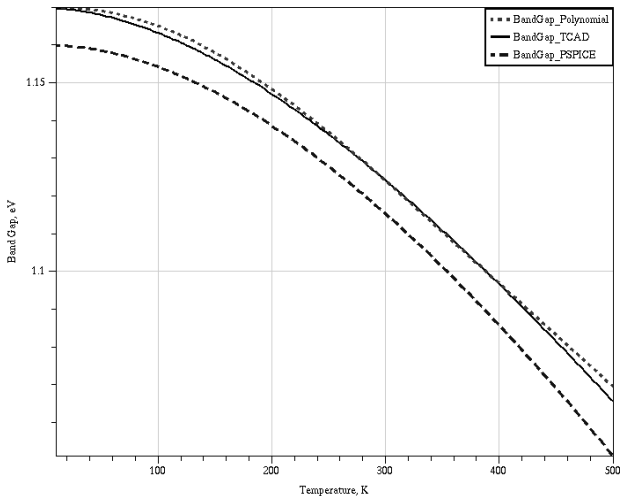


Рис. 5. Графики зависимости ширины запрещенной зоны от температуры, рассчитанные с помощью разных моделей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Physical Model Interface – удобный инструмент, позволяющий значительно расширить возможности пользователя TCAD Sentaurus при электрофизическом моделировании полупроводникового прибора. Интерфейс является гибким и дружелюбным к пользователю: он поддерживает основные математи-

ческие операции и при расчетах способен учитывать технологические характеристики (концентрацию примеси), а также позволяет на различных интервалах параметров использовать различные модельные уравнения.

В настоящей работе для исследования методики применения интерфейса рассмотрены модели объемной подвижности электронов в кремнии, включающие верхний интервал криогенного диапазона температур и модели ширины запрещенной зоны кремния, которые можно использовать при моделировании МОП-транзисторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Synopsys Inc. Sentaurus Device User Guide: Version M-2016.12. – December 2016.
2. *Петросяну К.О.* Состояние работ в области моделирования полупроводниковых компонентов с учетом влияния радиации и температуры // Наноиндустрия. – 2018. – № 82. – С. 42–45.
3. *Dorckel J.M., Leturcq P.H.* Carrier mobilities in silicon semi-empirically related to temperature, doping and injection level // Solid-State Electronis. – 1981. – Vol. 24, N 9. – P. 821–825.
4. *Резевиг В.Д.* Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Вып. 2. Модели компонентов аналоговых устройств. – М.: Радио и связь, 1992. – 64 с.
5. *Green M.A.* Intrinsic concentration, effective density of states, and effective mass in silicon // Journal of Applied Physics. – 1990. – Vol. 67. – P. 2944–2954.

Кузнецов Максим Андреевич, лаборант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование полупроводниковых приборов, TCAD-моделирование. E-mail: kuznecov_aprel85@mail.ru

Калинин Сергей Васильевич, старший преподаватель кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – математическое моделирование в микроэлектронике, в том числе TCAD-моделирование кремниевой элементной базы современных интегральных схем. E-mail: kalinin55@yandex.ru

Черкаев Алексей Сергеевич, старший преподаватель кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного

технического университета. Область научных интересов – тензорезистивные сенсоры давления и TCAD. E-mail: Cherkayev@corp.nstu.ru

Остертак Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – нано- и микросистемная техника. E-mail: ostertak@ngs.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-39-48

Investigating physical model interface in the TCAD Sentaurus environment[†]

M.A. Kuznetsov¹, S.V. Kalinin², A.S. Cherkayev³, D.I. Ostertak⁴

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, laboratory assistant of the Semiconductor Devices and Microelectronics Department. E-mail: kuznecov_aprel85@mail.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, senior lecturer of the Semiconductors Devices and Microelectronics Department. E-mail: kalinin55@yandex.ru*

³ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, senior lecturer of the Semiconductors Devices and Microelectronics Department. E-mail: cherkayev@corp.nstu.ru*

⁴ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, candidate of technical sciences, head of the Semiconductors Devices and Microelectronics Department. E-mail: ostertak@ngs.ru*

Currently, the application SDevice software package TCAD Sentaurus is a reliable tool for electrophysical simulation of silicon CMOS transistors operating in the temperature range of -60 °C – +125 °C. To adapt the modeling process to specific physical conditions of the devices, application SDevice has an extensive library of models of electrophysical parameters, in particular models of mobility or band gap energy. However, when the device operates under extreme cryogenic conditions, there is a need to rework these models using a special Physical Model Interface (PMI). The paper presents methodological features of work with PMI and results of implementation of custom parameter models for silicon devices.

Keywords: TCAD Sentaurus, SDevice, Physical Model Interface, PMI, model, mobility

^{*} *Received 20 September 2020.*

REFERENCES

1. Synopsys Inc. *Sentaurus Device User Guide, Version M-2016.12*. December 2016.
2. Petrosyants K.O. Sostoyanie rabot v oblasti modelirovaniya poluprovodnikovyykh komponentov s uchetom vliyaniya radiatsii i temperatury [The status of semiconductor components modeling with respect to thermal and radiation effects]. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2018, no. 82, pp. 42–45.
3. Dorckel J.M., Leturcq P.H. Carrier mobilities in silicon semi-empirically related to temperature, doping and injection level. *Solid-State Electronis*, 1981, vol. 24, no. 9, pp. 821–825.
4. Rezevig V.D. *Primenenie programm P-CAD i PSpice dlya skhemotekhnicheskogo modelirovaniya na PEVM*. Vyp. 2. *Modeli komponentov analogovykh ustroystv* [Application of P-CAD and PSpice programs for schematic modeling on PC. Iss. 2. Models of analogue devices components]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1992. 64 p.
5. Green M.A. Intrinsic concentration, effective density of states, and effective mass in silicon. *Journal of Applied Physics*, 1990, vol. 67, pp. 2944–2954.

Для цитирования:

Исследование интерфейса внедрения физических моделей в среде TCAD SENTAURUS / М.А. Кузнецов, С.В. Калинин, А.С. Черкаев, Д.И. Остертак // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 3 (98). – С. 39–48. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-39-48.

For citation:

Kuznetsov M.A., Kalinin S.V., Cherkaev A.S., Ostertak D.I. Issledovanie interfeisa vnedreniya fizicheskikh modelei v srede TCAD SENTAURUS [Investigating physical model interface in the TCAD Sentaurus environment]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 3 (98), pp. 39–48. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-39-48.

РАЗРАБОТКА «УМНОЙ ТЕПЛИЦЫ» НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ «РАСТЕНИЕ–СРЕДА–СИТУАЦИЯ–УПРАВЛЕНИЕ»*

М.Г. ГРИФ¹, Б.А. БЕЛЬГИБАЕВ², А.А. УМАРОВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления. E-mail: grifmg@mail.ru

² 050400, РК, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, доктор технических наук, доцент кафедры «Искусственный интеллект и Big Data». E-mail: bbelgibaev@list.ru

³ 050400, РК, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, PhD докторант кафедры «Искусственный интеллект и Big Data». E-mail; uaa_77@mail.ru

Теплица представляет собой агроэкологическую систему закрытого типа, в которой энергетические процессы строго детерминированы технологическим процессом выращивания растений с учетом влияния окружающей среды.

Как известно, модели теплиц делятся на два типа: модели белого ящика и модели черного ящика. Известная модель системы «почва–растение–атмосфера» относится к первому типу, построенному на физических принципах термо-, гидро- и газовой динамики. Она состоит из нескольких сложных дифференциальных уравнений, в которых используются многочисленные коэффициенты и параметры, которые заранее известны. Такие модели громоздки и требуют больших вычислительных ресурсов и временных затрат.

Предлагаемая модель системы «растение–среда–ситуация–управление» является практическим аналогом известной модели «почва–растение–атмосфера». Главным отличием настоящей модели является то, что она относится к модели типа черного ящика, являющейся аппроксимацией наблюдаемых процессов и позволяет описывать процессы на основе экспериментальных данных.

На базе модели «растение–среда–ситуация–управление» разработана программно-техническая система «умная теплица», которая является человеко-машинной системой с рациональным разделением функции подготовки (ЭВМ) и функции принятия решений (человек). Она позволяет выполнять контроль и управление ростом растения в течение вегетационного периода с учетом влияния условий среды. Система внедрена и используется в теплице Казахского национального университета им. Аль-Фараби.

* Статья получена 10 сентября 2020 г.

Ключевые слова: умная теплица, экспертная система, закон оптимума, человеко-машинная система, система «почва–растение–атмосфера», IoT-устройства, облачные технологии

ВВЕДЕНИЕ

Для полноценного роста растений необходимо соблюдение технологических процессов по обеспечению условий, близких к закону оптимума в биологии. Тепло, свет, вода, воздух и питание – все эти факторы необходимы и одинаково важны для растений [5, 8, 12].

Известные модели теплиц с точки зрения учитываемых факторов можно разделить на три типа: а) модели, учитывающие только состояние среды (модели микроклимата); б) модели, учитывающие только состояние растения в течение вегетационного периода развития; в) модели, учитывающие и состояние растения, и состояние среды. Очевидно, что третий тип модели является очень трудоемким и сложным с точки зрения разработки.

Модели первого типа [6, 9, 10, 11, 13] являются более простыми и легко реализуемыми. Большинство их однофакторные, то есть предусматривают регулирование только одного технологического процесса (например, температуры или полива). Поэтому они часто используются на практике и широко внедрены на рынке тепличного хозяйства. Недостаток моделей первого типа в том, что они не учитывают состояния растения, а растение является самым главным звеном системы.

Модели второго типа [5, 12] имеют более сложную математическую интерпретацию и в основном используются в биологических исследованиях динамики роста, оценки перехода фаз и т. д. Такие модели известны под названием «почва–растение–атмосфера». Сложность моделирования процессов агроэкосистем типа «почва–растение–атмосфера» состоит в том, что они включают большое количество подсистем различной физической, химической и биологической природы, и разработка таких систем очень трудоемкая.

Первые два типа моделей не могут дать целостного описания процессов выращивания растений в теплице. Поэтому возникла необходимость объединения их возможностей в единую модель [3, 4].

Еще есть важное обстоятельство, заключающееся в том, что никакие точные и вычислительные системы не могут заменить человека в принятии решений и управлении сложными системами [2]. АСУ ТП относится к человеко-машинным системам, так как центральное место в управлении сохраняется за человеком. Поэтому в настоящей работе предлагается подход, основанный на человеко-машинной обработке данных. То есть он сочетает в себе машинную обработку (мониторинг и управление состояния среды) данных и полуавтома-

тическую обработку (наблюдение за состоянием растения осуществляется человеком).

Разработанная модель системы «растение–среда–ситуация–управление» является практическим аналогом известной модели биологической системы «почва–растение–атмосфера», объединяющей в себе и биологическую, и техническую составляющие. Предназначение системы «растение–среда–ситуация–управление» – оценка соответствия закону оптимума состояния текущих условия среды и растения.

1. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «РАСТЕНИЕ–СРЕДА–СИТУАЦИЯ–УПРАВЛЕНИЕ»

Математическая модель системы «растение–среда–ситуация–управление» состоит из блоков: среда, растение, ситуация и управление.

Блок 1 – «Среда». Описывает состояние микроклимата в суточном (атмосфера – температура воздуха, относительная влажность воздуха; почва – относительная влажность почвы; свет – освещенность) и биологическом масштабе времени (наступление фазы развития растения и т. д.).

Блок 2 – «Растение». Описывает состояние растения и является объектом управления.

Блок 3 – «Ситуация–управление». Характеризует переменные состояния системы и выбор режима управления (вентиляция, освещение, капельное орошение) в зависимости от определенной ситуации. В этом блоке рассчитываются интегральные показатели среды и растения.

Модель системы «растение–среда–ситуация–управление» задается в виде *кортежа*

$$\langle Z, F, OPT_{real}, OPT, O_{real}, O, U_{real}, U, D(t), J(t), t(i, j) \rangle, \quad (1)$$

$$Z = \langle Z(D, m), Z_{FAZA}(J, t^*) \rangle,$$

$$F = \langle F_{IN}(D, k), F(D, p), F_{OUT}(J, l), F_{FAZA}(J, t^*) \rangle,$$

$$OPT_{real}(D) = \langle r, PF(D, k), \overline{PF}(D, p) \rangle, \quad O_{real}(D) = \langle p, OPT_{real}(D) \rangle,$$

$$U_{real}(D) = \langle p, O_{real}(D) \rangle,$$

$$OPT(J) = \langle PF_{OUT}(J), PF_{FAZA}(J, t^*), PZ_{FAZA}(J, t^*) \rangle,$$

$$O(J) = \langle Z(D, m), F_{OUT}(J), OPT(J), Z_{FAZA}(J, t^*), F_{FAZA}(J, t^*) \rangle,$$

$$U(J) = \langle r, O(J) \rangle,$$

где $Z(D, m)$ – состояние растения – входной параметр (данные); $F_{IN}(D, k)$ – состояние среды – входной параметр (данные); $F(D, p)$ – состояние среды по каждому процессу – расчет; $F_{OUT}(D, l)$ – интегральные состояния среды – расчет; $P_{FAZA}(J)$ – условия наступления фаз развития растения – входной параметр (задание); $Z_{FAZA}(J)$ – выполнение условия $P_{FAZA}(t)$ по состоянию растения – расчет; $F_{FAZA}(J)$ – выполнение условия $P_{FAZA}(t)$ по состоянию среды – расчет; $PZ(J)$ – условия оптимума растения – входной параметр (задание); $PF(D, k)$ – четкие условия оптимума среды – входной параметр (задание); $\overline{PF}(D, p)$ – нечеткие условия оптимума среды – входной параметр (задание); $PF_{OUT}(D, l)$ – условия интегрального состояния среды – входной параметр (задание); $U_{real}(D, p)$ – режим управления по климату – расчет; $U(J, r)$ – режим управления по фазе – расчет; $OPT_{real}(D)$ – закон (функция) оптимума по климату – выходной параметр (задание); $OPT(J)$ – закон (функция) оптимума по фазе – выходной параметр (задание); $PZ_{FAZA}(J, t^*)$ – момент наступления фаз развития по состоянию растения – расчет; $PF_{FAZA}(J, t^*)$ – момент наступления фаз развития по состоянию среды – расчет; $O_{real}(D, p)$ – оценка состояния среды оптимуму – расчет; $O(J)$ – интегральная оценка состояния среды и растения оптимуму – расчет; $t \in [0; T]$ – период.

Дискретные моменты времени $t(i, j)$ описываются как функции $D(t), J(t)$:

$$D(t) = \begin{cases} 1, & t = t^{\text{восх}}, \\ 0, & t = t^{\text{зах}}, \end{cases}$$

$$J(t) = \begin{cases} 1, t = t^*, \\ 2, t = t^{**}, \\ 3, t = t^{***}, \end{cases}$$

где t^* , t^{**} , t^{***} – моменты наступления 1-й, 2-й, 3-й фазы развития растения; $t^{\text{восх}}$, $t^{\text{зах}}$ – моменты восхода и захода солнца.

Обозначения и индексы: t – время обычное непрерывное; $D(t)$ – время дискретное (суточное); $i = 0, 1, 2, \dots, n$ – номер дня; $J(t)$ – время дискретное (биологическое); $J = 0, 1, 2, 3$ – номер фенофазы растений; $r = 0, 1, 2, 3$ – номер режима управления: норма, вентиляция, освещение, полив; $k = 1, 2, 3, 4$ – номер параметра среды: температура воздуха, влажность воздуха, освещенность, влажность почвы; $l = 1, 2, 3, 4$ – номер интегрального показателя: суммарная эффективная температура, суммарная эффективная освещенность, световой период, теплопериод; $m = 1, 2, 3, 4$ – номер агротехнического показателя растения: число настоящих листьев, число завязей, число зеленцов, число спелых плодов; $p = 1, 2, 3$ – номер технологического процесса: вентиляция, освещение, полив.

2. ЗАДАЧА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ «РАСТЕНИЕ–СРЕДА–СИТУАЦИЯ–УПРАВЛЕНИЕ»

В распоряжении эксперта, с участием которого формируется технологическое управление, имеется база данных (БД), в которой на всем интервале вегетации зафиксированы в динамике состояния растений $Z(t)$, климатические факторы $F(t)$, режимные параметры технологических операции $u_r(t)$, $r = 0, 1, 2, 3$ (норма / режим вентиляции / режим освещения / режим полива). Эксперт по состоянию растений и климатическим факторам $F(t)$ в БД оценивает ситуацию $O(t)$.

В зависимости от ситуации $O(t)$ выбираются соответствующие режимы управления $U(t(D, J))$ по климату $D = \{1; 0\}$ (день/ночь) и по фазе $J = \{0; 1; 2; 3\}$ (фаза 0, фаза 1, фаза 2, фаза 3). Цель экспертной системы – дать оценку близости ситуации оптимуму $OPT(t)$, который включает нормы среды и необходимые условия роста растения. Таким образом, если исходную информацию в БД, в которой зафиксирована эволюция состояния среды и растения под воздействием климатических факторов и вариантного технологического управления, дополнить оценками эксперта по исходной ситуации, то она уже становится базой знаний (БЗ).

В таком случае задачей обработки полученной БЗ будет получение правила выбора вариантов технологического управления в зависимости от ситуации. Это решающее правило (РП) должно удовлетворять требованиям максимума результативности управления по заданной экспертом шкале:

$$U^*(t) = \arg \max \{OPT(t) | O(t, X, F, U)\}. \quad (2)$$

Заметим, что полученное решение РП используется одинаково как на стадии планирования, так и при реализации технологических управлений в реальном времени.

При реализации алгоритмов обработки БЗ в работе применяется нейросетевой подход. Во входном слое нейронной сети по вектору состояния растений $X(t)$ и климатическим факторам $F(t)$ формируются оценки технологической ситуации:

$$\hat{O}(t) = K_1^T X(t) + K_2^T F(t), \quad (3)$$

$$K_1^T, K_2^T = \arg \min [O(t) - K_1^T X(t) + K_2^T F(t)], \quad (4)$$

где K_1^T, K_2^T – матрицы параметров первого слоя нейронной сети; $\hat{O}(t)$ – оценки ситуации, задаваемые экспертом. Схема формирования технологического управления с участием экспертной системы и нейронной сети приведена на рис. 1.

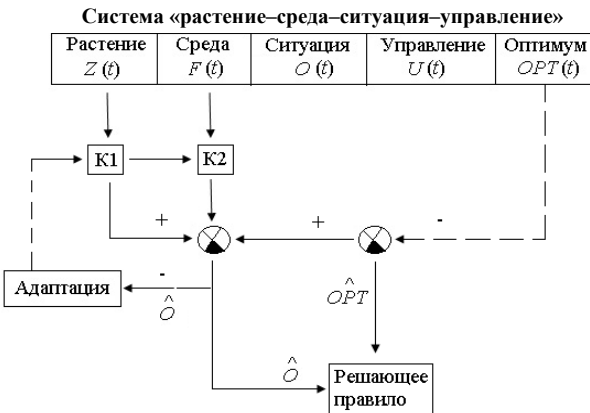


Рис. 1. Схема управления системой с участием экспертной системы

Поставленная задача (2)–(4) является задачей идентификации блока «ситуация – управление». Таким образом, на основе информации о состоянии среды $F(t)$ и растения $Z(t)$, и требований условий оптимума $OPT(t)$ формируются оценки ситуации $\hat{O}(t)$. В зависимости от этой ситуации система формирует РП $U^*(t)$, обеспечивающее выполнение условия (2).

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ В ВИДЕ СИСТЕМЫ «АҚЫЛДЫ ЖЫЛЫЖАЙ» И ВНЕДРЕНИЕ В ТЕПЛИЦУ УНИВЕРСИТЕТА

Модель (1) реализована в виде программно-технической системы «Ақылды жылыжай» и внедрена в теплице КазНУ им. Аль-Фараби [1, 7]. Ее функциональная схема приведена на рис. 2. Она состоит из основных блоков: а) объекта управления, в центре которого расположено растение; б) информационно-измерительной системы; в) исполнительных механизмов; г) устройства управления (УУ). Системой управляет УУ, построенное на базе модели (2)–(4), которое вырабатывает управляющее воздействие на основе правил эксперта, текущей входной информации, полученной с датчиков среды, и отправляет соответствующему исполнительному механизму. Обмен данными также происходит через УУ, которое посылает данные на облачное хранилище данных Blynk. Данные из облачного хранилища для машинной обработки поступают на скрипт Matlab, после обработки обратно поступают к УУ через облачное хранилище. Данные мониторинга сохраняются в хранилище в течение всего вегетационного периода.

Практическая реализация системы «Умная теплица» (рис. 2), обладающей требуемыми функциональными возможностями [1, 7], возможна только при использовании современных беспроводных, IoT и интеллектуальных технологий. В качестве беспроводных и IoT-устройств были использованы недорогие микроконтроллеры серии ESP32 с низким энергопотреблением. Главное их достоинство: передатчик ESP32 WiFi&Bluetooth CP2104 DHT11 Soil battery, имеющий встроенные датчики воздуха, освещения и почвы, и приемник ESP 32 WiFi&Bluetooth battery могут осуществлять бесперебойную передачу данных и через WiFi, и через Bluetooth после отключения сети через встроенную батарею.

На рис. 3 и 4 показаны экспериментальные данные о среде и растении за 75 дней. Это среднесуточные данные среды и средний показатель урожайности каждого растения. Средний урожай составил 3-4 кг с одного растения. Поддерживая оптимальные условия в теплице, можно получить несколько урожаев в течение двух-трех месяцев.

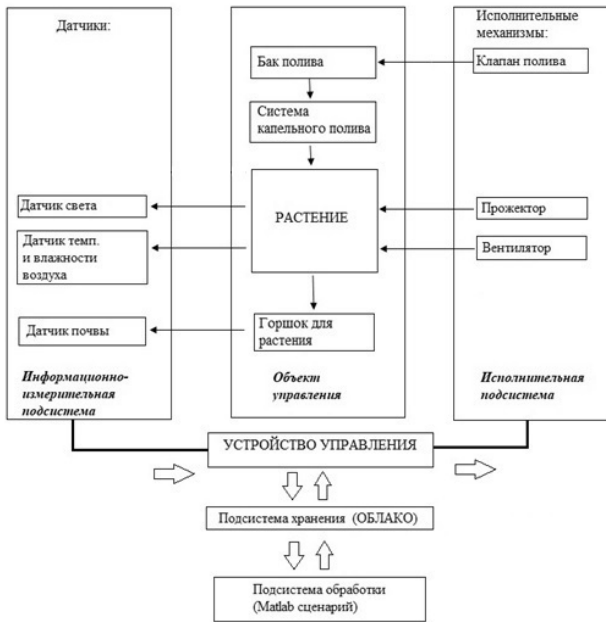


Рис. 2. Функциональная схема автоматизации теплицы

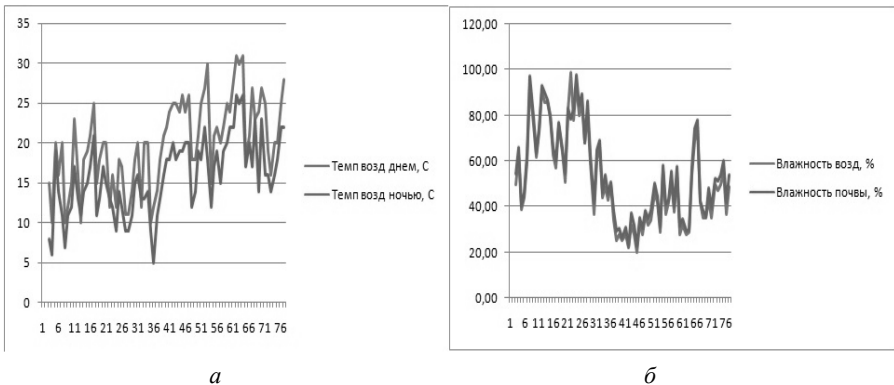


Рис. 3. Данные мониторинга:

а – температуры воздуха; б – влажности воздуха

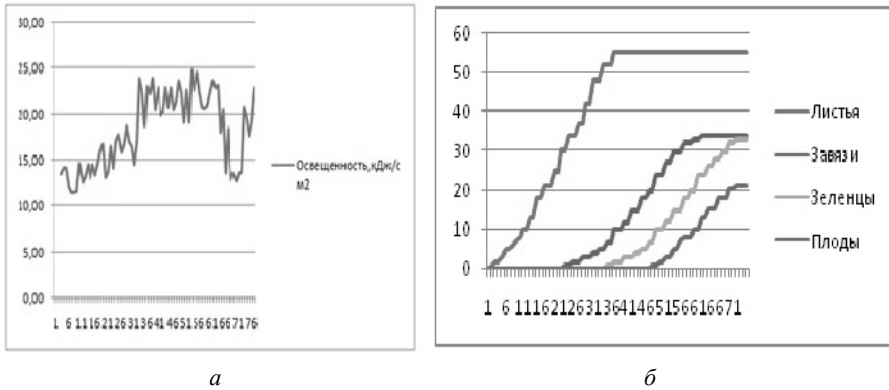


Рис. 4. Данные мониторинга:

a – освещенности; *б* – динамики роста

С помощью проведенного биологического эксперимента были получены оценки состояния воздушной и почвенной среды, освещенности и общая интегральная оценка среды и растения. Рассчитанные условия наступления фаз: $t^* = 9$, $t^{**} = 31$, $t^{***} = 57$, реальные моменты фаз растения соответственно равны: $t^* = 11$, $t^{**} = 38$, $t^{***} = 65$.

На рис. 5 и 6 изображены гистограммы, показывающие значения средне-квадратических отклонений от оптимумов для воздушной среды, освещенности, почвы и растения. Значения оценок соответственно равны: $O_1 = 0.4008$, $O_2 = 0.1797$, $O_3 = 1.5159$ (рис. 5, рис. 6, *a*). Общая интегральная оценка составляет $O = 2.1105$ (рис. 8, *a*). Графики нечеткого логического вывода базы знаний *Aqildi_Plant_Optimum* на рис. 7 и 8 показывают, что интегральное состояние среды и растения находится вблизи зоны оптимума, обеспечивая тем самым благоприятные условия для растений. Результаты подтверждают, что наблюдаемые состояния подчиняются закону оптимума в течение всего периода роста растения.

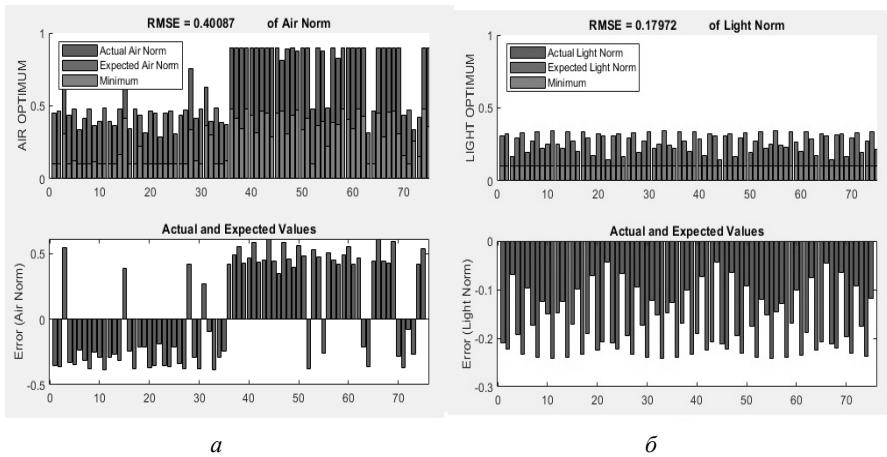


Рис. 5. Оценка оптимума:

a – воздушной среды; *б* – освещенности

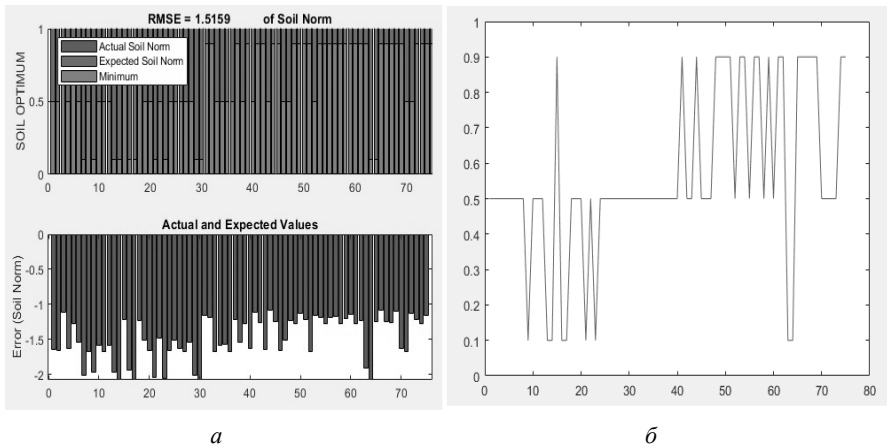
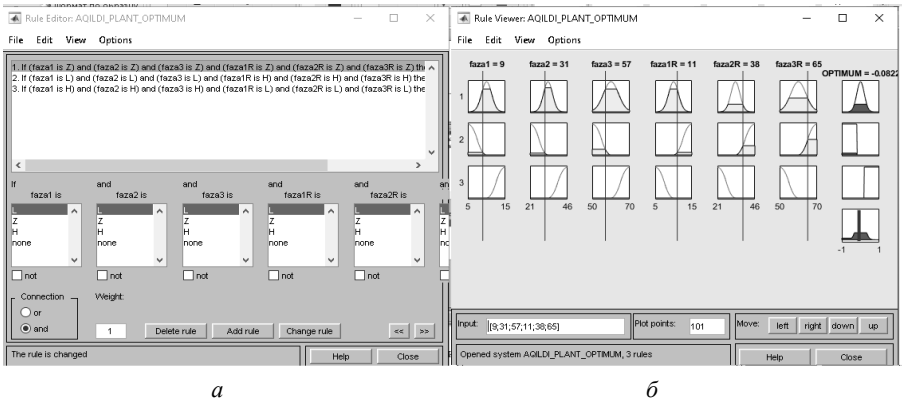


Рис. 6. Оценка оптимума:

a – почвенной среды; *б* – нечеткого вывода почвенной среды FIS_OPT3

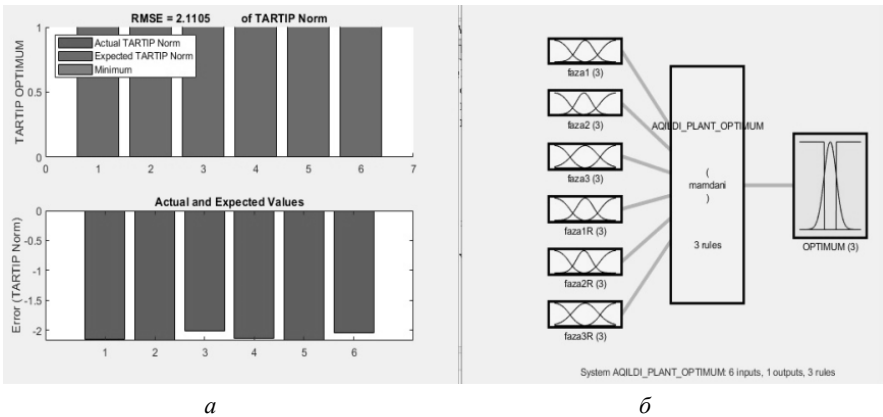


а

б

Рис. 7. База знаний Aqildi_Plant_Optimum:

а – правила; б – вывод правил



а

б

Рис. 8. База знаний Aqildi_Plant_Optimum:

а – расчет оценки; б – структура системы

На рис. 9 представлена теплица КазНУ им. Аль-Фараби в вегетационный период выращивания культуры огурцов и схема третьего блока, где был проведен эксперимент.

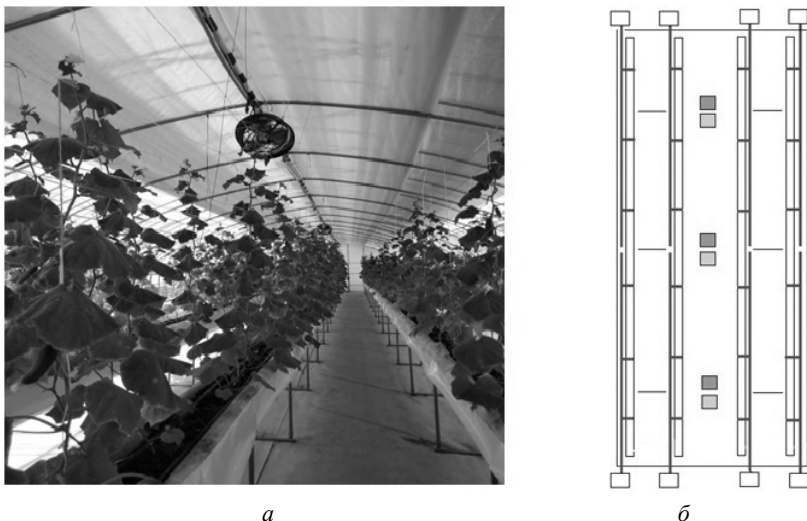


Рис. 9. Теплица КазНУ им. Аль-Фараби:

а – выращивание культуры огурцов; *б* – схема третьего блока

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается модель системы «растение–среда–ситуация–управление», предлагаемая авторами как альтернативный вариант системы «почва–растение–атмосфера». В отличие от системы «почва–растение–атмосфера», являющейся моделью типа белого ящика, предлагаемая модель является моделью типа черного ящика и позволяет описывать процессы на основе экспериментальных данных.

На базе построенной модели системы «растение–среда–ситуация–управление» была практически реализована программно-техническая система «Акылды жылыжай» и внедрена в теплице КазНУ им. Аль-Фараби.

В результате исследования были сделаны следующие выводы:

а) при оптимальных условиях среды наблюдается процесс нормального, сбалансированного роста растения;

б) при неоптимальных условиях, т. е. при недостатке определенных факторов (тепло, воздух, свет, вода), наблюдается замедленный процесс роста растения.

Для оценки состояния планируется в будущем применить технологию компьютерного зрения в двух вариантах: 1) сегментация отдельных растений

и оценка (распознавание), 2) без сегментации для группы растений. Этот способ поможет полностью автоматизировать процесс оценки состояния растений и тем самым повысить точность оценки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бельгибаев Б.А., Умаров А.А.* Домашняя смарт-теплица: патент на полезную модель. – № 2019/1162.2. – 30.12.2019.
2. *Гриф М.Г.* Гибридная экспертная система проектирования человеко-машинных систем и принятия решений ИНТЕЛЛЕКТ-3: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 160 с.
3. *Михалейко И.М.* Управление системами точного земледелия. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2005. – 234 с.
4. *Михайленко И.М.* Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных // *Сельскохозяйственная биология.* – 2007. – № 1. – С. 103–111.
5. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2006. – 396 с.
6. *Савосин С.И.* Интеллектуальная система контроля влажности и температуры воздуха в теплице: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 25 с.
7. Умная теплица: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 7578 / Умаров А.А., Бельгибаев Б.А., Мансурова М.Е., Арипхан Ж.Н. – За-рег. 17.01.2020.
8. *Klapwijk D.* *Kasklimaat: plantengroei en groeibeheersing onder glas.* – Amsterdam: Agon Elsevier, 1971. – 126 p.
9. *Akkac M.A., Sokullu R.* An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes // *Procedia Computer Science.* – 2017. – Vol. 113. – P. 603–608.
10. *Syam R., Piarah W.H., Jaelani B.* Controlling smart green house using fuzzy logic method // *International Journal on Smart Material and Mechatronics.* – 2015. – Vol. 2, N 2. – P. 116–120.
11. *Revathi S., Sivakumaran N.* Fuzzy based temperature control of greenhouse // *IFAC-PapersOnLine.* – 2016. – Vol. 49 (1). – P. 549–554.
12. *Thornley J.H.M.* *Mathematical models in plant physiology.* – London; New York: Academic press, 1976. – 318 p.
13. *Ahmad U., Subrata D.M., Arif Ch.* Speaking plant approach for automatic fertigation system in greenhouse // *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition.* – 2011. – Vol. 4, N 3.

Гриф Михаил Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. E-mail: grifmg@mail.ru

Бельгибаев Бауржан Абдрахимович, доктор технических наук, доцент кафедры искусственный интеллект и Big Data Казахского национального университета им. Аль-Фараби. E-mail: bbelgibaev@list.ru

Умаров Амантур Амангельдыевич, докторант PhD кафедры «Искусственный интеллект и Big Data» Казахского национального университета им. Аль-Фараби. E-mail: uaa_77@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-49-64

Development of a “smart greenhouse” based on the model “plant–environment–situation–control”*

M.G. Grif¹, B.A. Belgibaev², A.A. Umarov³

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automated Control Systems. E-mail: grifmg@mail.ru*

² *Kazakh National University them. Al-Farabi, 71 Al-Farabi Avenue, Almaty, 050400, Kazakhstan, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Artificial Intelligence and Big Data. E-mail: bbelgibaev@list.ru*

³ *Kazakh National University them. Al-Farabi, 71 Al-Farabi Avenue, Almaty, 050400, Kazakhstan, PhD PhD student, Department of Artificial Intelligence and Big Data. E-mail: uaa_77@mail.ru*

The greenhouse is a closed-type agroecological system in which energy processes are strictly determined by the technological process of growing plants, taking into account the influence of the environment. As you know, greenhouse models are divided into two types: white box models and black box models. The well-known model of the “Soil-Plant-Atmosphere” system belongs to the first type, built on the physical principles of thermo-, hydro- and gas dynamics. They consist of several complex differential equations that use numerous coefficients and parameters that are known in advance. Such models are cumbersome and require large computational resources and time-consuming. The proposed model of the system “Plant-Environment-Situation-Management” is a practical analogue of the well-known model “Soil-Plant-Atmosphere”. The main difference of this model is that it refers to a black box model, which is an approximation of the observed processes and allows you to describe processes based on experimental data. On the basis of the “Plant-Environment-Situation-Management” model, the software and hardware system “Smart Greenhouse” was developed, which is a human-machine system with a rational separation of the functions of preparation (computer) and decision-making (Man). It allows you to control and control the growth and development of the

* Received 10 September 2020.

plant during the growing season, taking into account the influence of environmental conditions. The system is implemented and used in the greenhouse of the Kazakh National University. Al-Farabi.

Keywords: smart greenhouse, expert system, optimum law, human-machine system, “Soil–Plant–Atmosphere” system, IoT devices, cloud technologies

REFERENCES

1. Belgibaev B.A., Umarov A.A. *Domashnyaya smart-teplitsa teplica* [Home smart greenhouse]. Patent RF, no. 2019/1162.2, 2019.
2. Grif M.G. *Gibridnaya ekspertnaya sistema proektirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem i prinyatiya reshenii INTELLEKT-3* [INTELLECT-3 hybrid expert system for designing human-machine systems and decision making]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2007. 160 p.
3. Mikhaleinko I.M. *Upravlenie sistemami tochnogo zemledeliya* [Managing precision farming systems]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2005. 234 p.
4. Mikhailenko I.M. Matematicheskoe modelirovanie rosta rastenii na osnove eksperimental'nykh dannykh [Mathematical modelling of plant growth on the basis of experimental data]. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya = Agricultural Biology*, 2007, no. 1, pp. 103–111.
5. Poluektov R.A., Smolyar E.I., Terleev V.V., Topazh A.G. *Modeli proizvodnogo protsessa sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Models of the production process of agricultural crops]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2006. 396 p.
6. Savosin S.I. *Intellektual'naya sistema kontrolya vlazhnosti i temperatury vozdukh v teplitse*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Intelligent greenhouse air humidity and temperature control system. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2009. 25 p.
7. Umarov A.A., Belgibaev B.A., Mansurova M.E., Aripkhan Zh.N. *Umnaya teplitsa* [Smart greenhouse]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 7578, 2020.
8. Klapwijk D. *Kasklimaat: plantengroei en groeibeheersing onder glas*. Amsterdam, Agon Elsevier, 1971. 126 p.
9. Akkac M.A., Sokullu R. An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 113, pp. 603–608.
10. Syam R., Piarah W.H., Jaelani B. Controlling smart green house using fuzzy logic method. *International Journal on Smart Material and Mechatronics*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 116–120.

11. Revathi S., Sivakumaran N. Fuzzy based temperature control of greenhouse. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49 (1), pp. 549–554.
12. Thornley J.H.M. *Mathematical models in plant physiology*. London, New York, Academic press, 1976. 318 p.
13. Ahmad U., Subrata D.M., Arif Ch. Speaking plant approach for automatic fertigation system in greenhouse. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2011, vol. 4, no. 3.

Для цитирования:

Гриф М.Г., Бельгибаев Б.А., Умаров А.А. Разработка «Умной теплицы» на основе модели «растение–среда–ситуация–управление» // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 3 (98). – С. 49–64. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-49-64.

For citation:

Grif M.G., Belgibaev B.A., Umarov A.A. Razrabotka “Umnoi teplitsy” na osnove modeli “rastenie–sreda–situatsiya–upravlenie” [Development of a “smart greenhouse” based on the model “plant–environment–situation–control”]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 3 (98), pp. 49–64. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-49-64.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

УСЛОВИЯ ПРИЕМА СТАТЕЙ

В редакцию **Сборника научных трудов НГТУ** представляются следующие материалы.

1. Статья объемом 8–12 страниц от магистрантов, аспирантов в соавторстве со специалистами, имеющими ученую степень, и 16–22 страницы от докторантов, печатная версия – два экземпляра, подписанных авторами (требования к оформлению см. на сайте: <http://sbornik.infoterra.ru>).

2. Контактная информация (телефоны, адреса электронной почты, место работы, должность, ученая степень, ученое звание автора) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)» – печатная версия, один экземпляр (<http://sbornik.infoterra.ru>).

4. Электронная версия статьи, контактной информации, описание статьи для базы данных РИНЦ, реферат на англ. языке – в отдельных файлах на CD.

5. Рецензия объемом одна-две страницы в двух экземплярах.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования – один экземпляр.

Внимание! Все математические формулы в статьях должны быть набраны в MathType.

Информацию о сборнике, дополнительную информацию, документацию по оформлению см. на сайте: <http://sbornik.infoterra.ru>
journals.nstu.ru/sbornik

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ РАЗДЕЛЫ СБОРНИКА

Автоматическое управление (и идентификация)

Моделирование процессов и устройств

Обработка информации

Современные информационные технологии

Электроэнергетика, электромеханика и электротехнологии

Механика (гидрогазодинамика)

Физика и математика

Материаловедение

Сообщения и дискуссии

Педагогика

Авторы, не являющиеся сотрудниками НГТУ, представляют сопроводительное письмо на имя проректора по научной работе НГТУ.

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов.

Плата за публикацию рукописей не взимается.