

Надійшла до редколегії 16.01.2019

Yerokhin Andriy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Software Engineering KhNURE. Scientific interests: computation intelligence, identification and visualization of abnormal situations. Address: Nauky Ave., 14, Kharkiv, Ukraine, 61166; tel. 70-21-446.

Zatserklyanyi Heorgii, aspirant of the Department of Software Engineering KhNURE. Scientific interests: process modeling. Address: Nauky Ave., 14, Kharkiv, Ukraine, 61166; tel. 70-21-446.

Babii Andriy, Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer of the Department of Software Engineering KhNURE. Scientific interests: parallel distributed systems. Address: Nauky Ave., 14, Kharkiv, Ukraine, 61166; tel. 70-21-446.

Turuta Oleksii, PhD of Technical Sciences, Assistant Professor, Associate Professor of the Department of Software Engineering KhNURE. Scientific interests: computation intelligence, architectures of service-based systems. Address: Nauky Ave., 14, Kharkiv, Ukraine, 61166; tel. 70-21-446.

Zolotukhin Oleg, Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Artificial Intelligence KhNURE. Scientific interests: cloud technologies, data mining. Address: Nauky Ave., 14, Kharkiv, Ukraine, 61166; tel. 70-21-337.

УДК 004.942:616.5-612.79

DOI: 10.30837/0135-1710.2019.176.009

Е. В. ВЫСОЦКАЯ, В. А. КЛИМЕНКО, А. П. ПОРВАН, А. А. ТРУБИЦИН, А. И. ДОВНАРЬ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АДАПТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕБЕНКА С АТОПИЧЕСКИМ ДЕРМАТИТОМ

В статье представлена математическая модель проточного хемостата для определения относительной результативности адаптивного процесса, позволяющая количественно выразить и определить состояние ребенка с atopическим дерматитом. Результаты анализа позволяют получить картину сравнительных характеристик изменения состояния больного.

1. Вступ

Атопический дерматит (АД) является одним из распространенных заболеваний современного человека. Согласно данным исследования The International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC), которое активно выявляло пациентов методом анкетирования, в мире АД страдает до 22,5% детей в возрасте 6-7 лет и до 24,6% детей 13-14 лет. Была также отмечена тенденция к глобальному увеличению распространенности АД в среднем на 2 % ежегодно [1]. По данным публикации [2], АД отмечается у 25 % детей школьного возраста и 10 % взрослых. В Украине распространенность АД среди детей составила 5,05% [3].

Данное заболевание оказывает существенное влияние на качество жизни больного и его семьи, нарушая в большей степени психическую сферу, и может быть причиной детской инвалидности [4]. АД - это не только заболевание кожи, но и начало грозного "атопического марша", так как у многих больных развиваются респираторные аллергические болезни - аллергический ринит и бронхиальная астма [5, 6]. От того, насколько рано и правильно будет диагностирован АД и насколько адекватной будет его терапия, зависит и дальнейший прогноз аллергии.

Постоянно продолжается поиск новых патогенетических механизмов, методов лечения АД, но, к сожалению, и на сегодняшний день лечение больного с аллергическим заболеванием не приводит к полному выздоровлению [7, 8]. А существующие выводы, полученные при проведении прямых эмпирических исследований особенности формирования и протекания АД, не позволяют объективизировать изменения функционального состояния больных с различной степенью тяжести АД без применения соответствующего математического обеспечения.

2. Постановка задачи исследования

Для аргументированного выбора терапии для конкретного больного и объективизации оценки течения АД предложено много моделей и методов, но ни один из них не удовлетворяет клиницистов полностью.

На сегодняшний день в процессе определения адаптационных механизмов организма человека, в том числе и детей [9], используются различные методы математической статистики, которые позволяют выявить скрытые закономерности в отношении морфофункциональных образований целостной системы [10, 11]. Кроме того, рядом авторов осуществлена попытка использования математических моделей и методов, описывающих компенсаторные механизмы организма биологического объекта, для принятия диагностического решения в области офтальмологии [12] и эндокринологии [13].

В работе [14] авторами предложена многопараметрическая математическая модель выявления изменений механизмов адаптивной функции человека для четырех распространенных фенотипов АД. Данная модель описывает динамику взаимодействия кожных покровов и аллергенов, приводящего к иммунной дисрегуляции, что позволяет оценить начало болезни, предположить направление ее прогресса. Существенным недостатком использования данной модели является громоздкость вычислений, характерных для математических моделей системной динамики, и использование в качестве основных предикторов математической модели результатов дорогостоящих исследований генетического и иммунологического статусов.

Для изучения характера взаимодействия межсистемных и внутрисистемных взаимоотношений в [15] использовался также математический метод корреляционной адаптометрии, в основу которого положен анализ парной корреляции для всех показателей определения адаптационного синдрома. Использование данного метода предполагает оценку степени связанности показателей с помощью корреляционного графа с последующим принятием решения о состоянии пациента на основе аппарата теории нечетких множеств.

Известен подход к моделированию адаптационных возможностей детей на основе энтропийного критерия [16]. В качестве измеряемых параметров рассматривались данные клиноортостатической пробы (КОП). В статье показано, что КОП является переходной характеристикой, позволяющей судить о резервах адаптации и потенциальных возможностях жизненно важных систем организма ребенка. Полученные с использованием энтропийного подхода адаптационные кривые с помощью кластерного анализа по координатам центроидов были разделены на пять групп, что позволило выделить пять универсальных типов адаптационных реакций. Однако предложенный подход не может быть адаптирован к случаю оценки адаптационных возможностей детей с АД ввиду отсутствия учета таких важных показателей, как удельная скорость изменения количества эозинофилов, показателей IgA и IgE, являющихся маркерами протекания различных фаз АД.

В [17] описан вычислительный метод выбора оптимальной тактики "активной терапии" для пациентов с АД, который использует гибридную динамическую модель патогенеза АД с целью определения сроков манифестации данной патологии у взрослого населения с использованием алгоритма дифференциальной эволюции. Недостатком использования метода является сложность решения рекуррентных уравнений оптимального управления в реальном масштабе времени, отсутствие возможности комплексной оценки адаптационных возможностей ребенка с АД с целью предотвращения манифестации данной патологии.

Таким образом, целью работы является разработка математической модели определения адаптационных возможностей ребенка с атопическим дерматитом на базе теории проточного культивирования.

3. Разработка математической модели

На любом уровне организации человеческий организм как адаптивная система должен обеспечивать адекватную форму отношений со средой с целью поддержания гомеостаза. Для этого в такую систему должен поступать определенный поток информации с последующим его преобразованием. При этом задача сводится к анализу усвоения некоторого стационарного случайного процесса [18]. В таком случае организм человека можно рассматривать как проточный преобразователь-культиватор [19]. В самоорганизующуюся систему (организм ребенка) поступает поток информации о состоянии окружающей среды

(пищевые, бытовые, пыльцевые аллергены и т.д.). В ответ на данный поток развиваются адаптационные процессы, которые устанавливают равновесие. Существенными показателями этого процесса являются такие характеристики, как эффективность ответа - α (уровень IgE), что обеспечивает результативность адаптивного процесса в виде площади поражения кожных покровов - w .

Существует определенное начальное состояние иммунной системы, которое в ответ на воздействие факторов внешней среды, используя резервные возможности адаптивной системы (организма ребенка), отвечает адекватными формами стереотипных реакций и в норме характеризуется отсутствием обострений и любых клинических проявлений заболевания.

Состояние иммунной системы может меняться по мере совершенствования механизмов поддержания гомеостаза ребенка и зависит от ряда факторов: генетических особенностей, возраста ребенка и совершенствования анатомофизиологических факторов системы, сопутствующих заболеванию. Если допустить наличие некоторого максимально возможного объема установленных адаптивных реакций ребенка на антигены среды, обеспечивающих его равновесное состояние, и минимально возможного, то текущее состояние может занимать любое из промежуточных значений. Исходя из клинической практики, состояние пациента может характеризоваться наличием либо отсутствием обострения АД.

Вне зависимости от вида параметра, характеризующего текущее состояние пациента (параклинический критерий), будем использовать безразмерную характеристику, которая может быть представлена как некоторая величина k_s

$$k_s = \frac{S_{tek}}{S_{normativnoe}}, k_s \in [0; 1], \quad (1)$$

где S_{tek} - измеренное значение признака; $S_{normativnoe}$ - значение признака в норме.

Таким образом, организм ребенка как адаптивная система с коэффициентом эффективности силы аллергической реакции α (показатель IgE) отвечает развитием воспаления (защитного продукта своей деятельности) как универсальным процессом, направленным на восстановление гомеостаза, и клинически манифестирует обострением различной длительности u (IgG) в форме адекватных реакций (стабилизация состояния больного).

Зависимость активности и эффективности отношений объект-среда, где могут происходить определенные колебания (0 - 30 % от общего количества лейкоцитов), отражает показатель μ (удельная скорость изменения показателя количества эозинофилов), который характеризует адаптивный ответ организма ребенка на средовые воздействия.

Скорость преобразования потока информации из среды v (нарушение сна) отражает скорость адаптации организма больного к клинически проявляющимся воспалительным процессам, что может быть представлено как:

$$\frac{dv}{dt} = -\alpha \cdot \mu \cdot u. \quad (2)$$

С одной стороны, воздействие представляет собой стационарный случайный процесс и несет в себе неточное отображение, а с другой - процесс его переработки и усвоения требует определенной оценки [20]. С учетом этого, колебание значений v можно выразить формулой:

$$\frac{dv}{dt} = D \cdot (v - s) - \alpha \cdot \mu \cdot u, \quad (3)$$

где D - показатель IgA; s - показатель зуда; $(v - s)$ - отражает отрицательное влияние наличия зуда на качество сна.

Динамику изменения u можно выразить формулой:

$$\frac{du}{dt} = \mu \cdot u - D \cdot u, \quad (4)$$

где $(D \cdot u)$ - количество незавершенных и не участвующих в обеспечении конечного результата реакций организма: ЧСС, эритроциты, цветной показатель, частота дыхания, вес, рост.

Относительная результативность адаптивного процесса, выраженная скоростью снижения площади поражения w , представлена выражением:

$$\frac{dw}{dt} = -(1 - \alpha) \cdot \mu \cdot u - D \cdot w. \quad (5)$$

Дифференциальные уравнения, приведенные выше, отражают процессы, протекающие в организме больного, как в проточной функциональной системе. Если такая система находится в некотором случайном стационарном потоке информации, то через определенный промежуток времени в результате образования адекватных ответных реакций устанавливается равновесное состояние «функциональная система - среда». Возможные возмущения в среде будут вызывать соответствующие изменения и в функциональной системе. Эти изменения будут направлены на сохранение равновесного состояния. В этом случае очень важна скорость стабилизации равновесного состояния, так как последняя определяет ее жизнеспособность. В ряде случаев это является определяющим фактором в обеспечении адаптивного процесса, поэтому представляет интерес его анализ.

Оценивая изменение площади поражения, величину показателя количества эозинофилов можно представить в виде показателя μ :

$$\mu = \frac{\mu_m \cdot v}{K + v}, \quad (6)$$

где $\mu_m = \max(\mu)$; K - показатель выраженности морфологических элементов сыпи.

Используя приведенное значение μ_m , получим систему уравнений относительно параметров u , v и w :

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = \frac{\mu_m \cdot v}{K + v} \cdot u - D \cdot u, \\ \frac{dv}{dt} = -\alpha \cdot \frac{\mu_m \cdot v}{K + v} \cdot u + D \cdot (s - v), \\ \frac{dw}{dt} = (\alpha - 1) \cdot \mu \cdot u - D \cdot w. \end{cases} \quad (7)$$

Решение полученной системы уравнений позволит определить относительную результативность адаптивного процесса организма ребенка с атопическим дерматитом.

4. Результаты моделирования и их обсуждение

Адаптационные возможности организма человека обладают различной интенсивностью в различных клинических случаях. Это может объясняться наличием коморбидных сторонних заболеваний, плохой отягощенной наследственностью, неблагоприятными условиями проживания и иными факторами, ослабляющими иммунную систему и отягчающими общее состояние больного. Описанный математический аппарат, заключающийся в решении системы дифференциальных уравнений (7), позволяет потенциально оценить относительную результативность адаптивного процесса организма w .

Для проверки результатов исследований были выбраны 6 клинических случаев больных с АД (табл. 1).

Полученные результаты исследований для 19 эпох моделирования представлены на рис. 1-3. Для удобства сравнения все кривые приведены к одному масштабу. Моделирование эпох проводилось с применением программного средства Mathcad.

Анализируя графики, представленные на рис. 1, можно сделать вывод, что регресс параметра v в течение времени t на фоне отсутствия или незначительных изменений поведения параметра u приводит к пропорциональному увеличению параметра w . Обратная тенденция наблюдается на графике, представленном на рис. 3, что отражается на незначительном показателе относительной результативности адаптивного процесса (рис. 3, б).

Это позволяет условно разделить больных на основе потенциальных способностей их организма к восстановлению (выздоровлению) на три диапазона: больные с высокими адаптационными возможностями организма (B1); больные с умеренными адаптационными возможностями организма (B2); больные с условно низкими адаптационными возможностями организма (B3).

Для подтверждения точности определения относительной результативности адаптивного процесса ребенка с АД были исследованы данные 268 пациентов, которые случайным

Исходные значения параметров моделирования

Параметр	Степень тяжести АД					
	тяжелая	тяжелая	средняя	средняя	легкая	средняя
1	2	3	4	5	6	7
w	10	30	90	95	80	8
K	30	7	9	9	16	11
s	6	10	10	5	8	5
v	7	7	5	8	7	6
μ	14	2	14	5	17	12
D	1.55	0.5	1.09	0.62	0,69	0,9
u	11.6	8.25	9.78	8	9,13	11,6
α	600	468	450	713	624	180

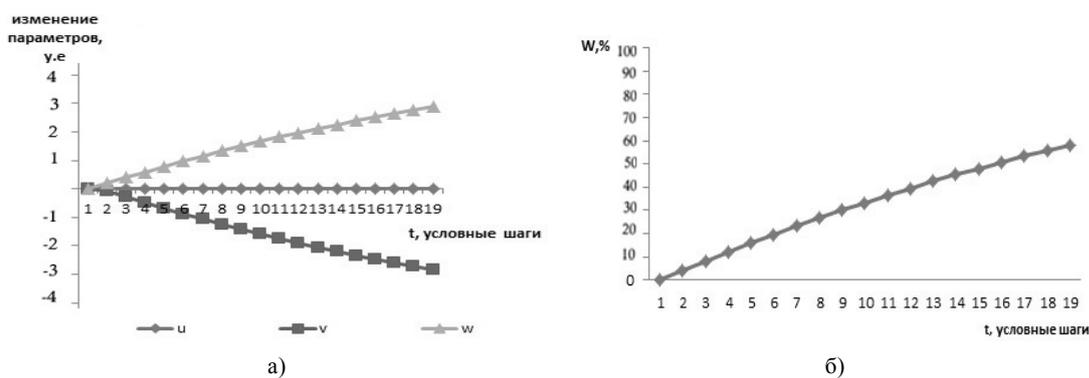


Рис. 1. Результаты моделирования: а) изменения моделируемых параметров;
б) изменения относительной результативности адаптивного процесса

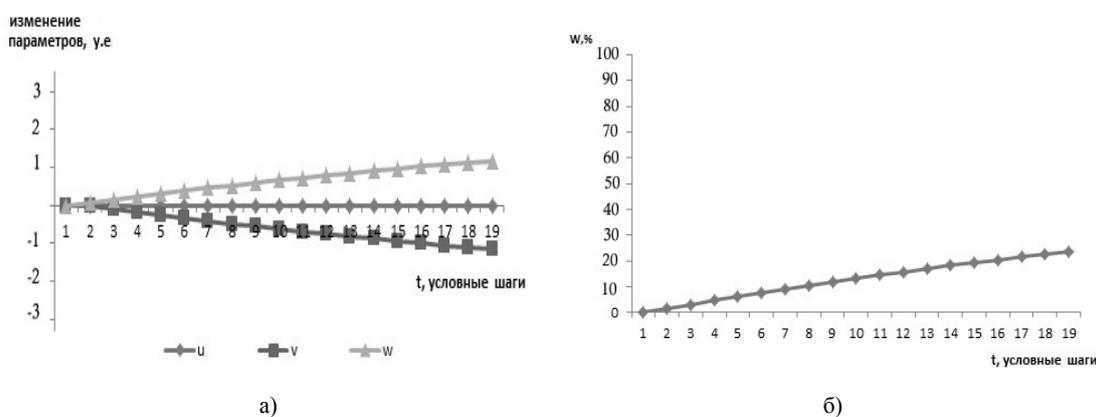


Рис. 2. Результаты моделирования: а) изменения моделируемых параметров;
б) изменения относительной результативности адаптивного процесса

образом были разделены на обучающую (35%), тестовую (15%), валидационную (50%) группы. В каждой группе присутствовали пациенты с состояниями В1, В2 и В3 (табл. 2).

В результате проведения статистического анализа исходных данных и результатов определения адаптационных возможностей организма ребенка с АД точность составила для обучающей выборки - 88,30 %; для тестовой выборки - 90,00 %; для валидационной выборки - 91,04 %.

Графическое представление проверки прогностических свойств разработанной модели выполняли на основе построения ROC-кривой (рис. 4).

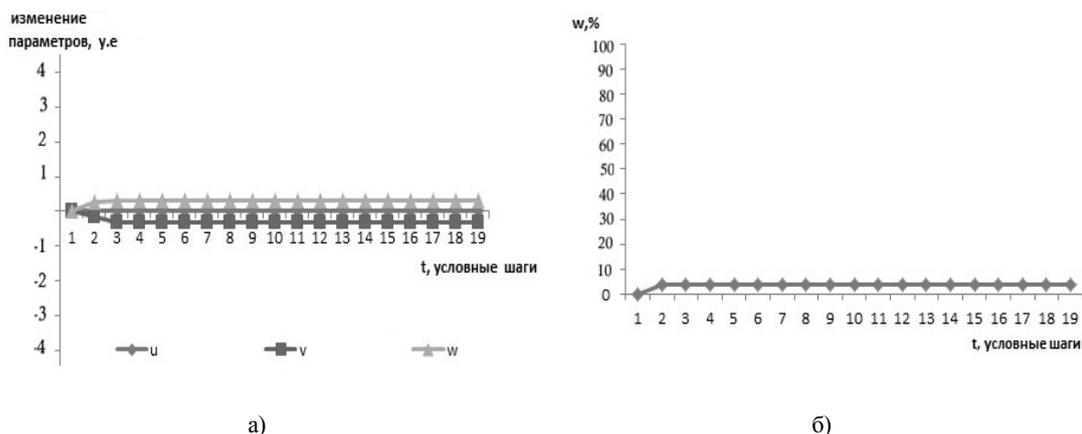


Рис. 3. Результаты моделирования: а) изменения моделируемых параметров; б) изменения относительной результативности адаптивного процесса

Таблица 2

Результаты определения классификационной точности разработанной математической модели

Состояние	Выборка								
	Обучающая			Тестовая			Валидационная		
	n	n'	% точности определения	n	n'	% точности определения	n	n'	% точности определения
B1	41	37	90,24	18	17	94,44	59	54	91,53
B2	29	24	82,75	13	11	84,62	42	38	90,47
B3	24	22	91,66	9	8	88,89	33	30	90,90
Общий, %	88,30			90,00			91,04		

Значение площади под кривой AUC (Area Under Curve) составило 0,84.

ROC-анализ полученной модели показал ее отличное качество. Чувствительность и специфичность обучающей, тестовой и валидационной выборок при сравнении по критерию χ^2 статистически значимо не отличаются ($p = 0,34$, $p = 0,41$ и $p = 0,27$, соответственно), что свидетельствует об адекватности построенной модели.

Общий анализ результатов решения системы дифференциальных уравнений для различных клинических случаев показывает, что степень выраженности адаптационных процессов организма можно сопоставить с характером изменения функции w: чем выше степень выраженности, тем больше значение w.

5. Выводы

Впервые разработана математическая модель определения адаптационных возможностей ребенка с атопическим дерматитом на основе теории непрерывного культиватора-хемостата. Данная модель отражает процессы, сопутствующие атопическому дерматиту, что позволяет более глубоко понять механизмы его возникновения и определить пути направленного воздействия синхронизации взаимообусловленных отношений морфофункциональных образований цело-

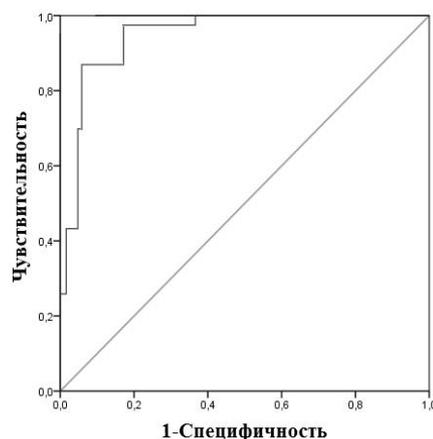


Рис. 4. ROC-кривая

стной системы их взаимодействия. Проведенное исследование изменения параметров системы дифференциальных уравнений позволило разделить больных на основе потенциальных способностей их организма к выздоровлению на три класса, что было подтверждено экспериментально.

Список литературы: 1. *Global variations in prevalence of eczema symptoms in children from ISAAC Phase Three* / J.A. Odhiambo, H.C. Williams, T.O. Clayton, C.F. Robertson, [etc.] // *J. Allergy Clin. Immunol.* 2009. Vol. 124 (6). P. 1251-1258. - doi:10.1016/j.jaci.2009.10.009. 2. *Brown, Sara J.* Atopic eczema / Sara J. Brown // *Clin. Medicine (London)*. 2016. Vol.16. N. 1. - pp. 66-69. doi: 10.7861/clinmedicine.16-1-66. 3. *Огнев, В. А.* Эпидемиология астмы и аллергии у детей. Монография / В. А. Огнев. - Х.: «Щедра садиба плюс», 2015. 336 с. ISBN 978-617-7306-37-4. 4. *Решетило, О. В.* Влияние атопического дерматита на качество жизни детей и родителей / О. В. Решетило, Т. В. Стоева, Н. Л. Весилык // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 9(40), Ч. 4. С. 65-67. Режим доступа: URL: <https://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/9-4-40.pdf#page=65>. 5. *Phenotypes of Atopic Dermatitis Depending on the Timing of Onset and Progression in Childhood* / Caroline Roduit, Remo Frei, Martin Depner, et al. // *JAMA Pediatr.* 2017. Vol. 171. N. 7. P. 655-662. doi:10.1001/jamapediatrics.2017.0556. 6. *Kapoor, R.* The prevalence of atopic triad in children with physician-confirmed atopic dermatitis / R. Kapoor, C. Menon, O. Hoffstad, W. Bilker // *J. Am. Acad. Dermatol.* 2008. Vol. 58. N. 1. P. 68-73. - doi: 10.1016/j.jaad.2007.06.041. 7. *Dinulos, James G.* New science and treatment paradigms for atopic dermatitis / James G. Dinulos, Alyssa Trickett, Caroline Crudele // *Current Opinion in Pediatrics*. 2018. Vol. 30 (1). P. 161-168. - doi: 10.1097/MOP.0000000000000560. 8. *Nankervis, H.* Scoping systematic review of treatments for eczema / H. Nankervis, K. S. Thomas, F. M. Delamere, et al. // Southampton (UK): NIHR Journals Library; 2016 May. (Programme Grants for Applied Research, No. 4.7). 2016. Режим доступа: URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK363127/> doi: 10.3310/pgfar04070. 9. *Porvan, A.* Technology for determining of students adaptive capabilities / A. Porvan // Paper presented at the 2015 «Information Technologies in Innovation Business Conference», ITIB 2015. Proceedings. P. 47-51. doi:10.1109/ITIB.2015.7355050. 10. *Yakubovska, S.* Developing a method for prediction of relapsing myocardial infarction based on interpolation diagnostic polynomial / Sofia Yakubovska, Olena Vysotska, Andrei Porvan, Dmytro Yelchaninov, et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, No. 9 (83). P. 41-49. - doi: 10.15587/1729-4061.2016.81004. 11. *Georgiyants, M.* Development of a mathematical model for predicting postoperative pain among patients with limb injuries / Marine Georgiyants, Oleksandr Khvysyuk, Nataliya Boguslavskaya, Anna Pecherska, et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2, No. 4 (86). P. 4-9. doi: 10.15587/1729-4061.2017.95157. 12. *Strashenko, A. N.* A method for prognosis of primary open-angle glaucoma / A. N. Strashenko, Y. A. Demin, I. V. Prasol, C. A. Sinenko, et al. // *International Review on Computers and Software (IRECOS)*. 2013. Vol. 8. No. 8. P. 1943-1949. 13. *Dobrorodnia, H.* Studying the mechanisms of formation and development of overweight and obesity for diagnostic information system of obesity / Hanna Dobrorodnia, Nina Gordiyenko, Ganna Chovpan, Marine Georgiyants, et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, No. 2 (84). P. 15-23. - doi:10.15587/1729-4061.2016.85390. 14. *Mathematical modeling of atopic dermatitis reveals «double-switch» mechanisms underlying 4 common disease phenotypes* / Elisa Dominguez-Huttinger, Panayiotis Christodoulides, Kosuke Miyauchi, Alan D. Irvine, et al. // *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 2017. Vol. 139. Iss. 6. P. 1861-1872. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2016.10.026>. 15. *Светличная, Г. Н.* Мультипараметрический системно-количественный метод оценки состояния здоровья человека / Г. Н. Светличная // *Сибирское медицинское обозрение*. 2007. № 43 (2). С. 3-6. 16. *Гергет, О. М.* Математические методы доказательной медицины в задачах прогнозирования здоровья детей раннего возраста / О. М. Гергет, В. А. Кочегуров, Г. А. Сакбасынова // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2013. № 10 (1). С. 29-34. 17. *Computational design of treatment strategies for proactive therapy on atopic dermatitis using optimal control theory* / P. Christodoulides, Y. Hirata, E. Dominguez-Huttinger, S.G. Danby, et al. // *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*. 2017. No. 375 (2016), 20160285. Режим доступа: URL: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/roypta/375/2016/20160285.full.pdf>. 18. *Seymour, V.* The Human-Nature Relationship and Its Impact on Health: A Critical Review / V. Seymour // *Frontiers in Public Health*. 2016. No.4. P. 260-272. <http://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00260>. 19. *Agoshko, Valeri I.* *Mathematical Models of Life Support Systems* / Valeri I. Agoshko, Jean-Pierre Puel. - Oxford, UK: EOLSS Publications, 2009. 504 p. ISBN-978-1-84826-579-0.

Надійшла до редколегії 25.01.2019

Высоцкая Елена Владимировна, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой радиоэлектронных и биомедицинских компьютеризированных средств и технологий (502) Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Адрес: Украина, 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17. E-mail: evisotska@ukr.net, тел.: +38 067-572-64-18.

Клименко Виктория Анатольевна, д-р мед. наук, профессор, заведующая кафедрой пропедевтики педиатрии № 2 Харьковского национального медицинского университета. Адрес: Украина, 61051, г. Харьков, ул. Клочковская, 337-а. E-mail: klymenkoviktorii@gmail.com

Порван Андрей Павлович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіоелектронних і біомедицинських комп'ютеризованих засобів і технологій (502) Національного аерокосмічного університету ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ». Адрес: Україна, 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17. E-mail: andreiporvan@gmail.com, тел.: +38 066-294-06-70.

Трубицин Алексей Алексеевич, аспірант кафедри біомедицинської інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки. Адрес: Україна, 61166, г. Харьков, пр. Науки, 14. E-mail: altr287@gmail.com, тел.: +38 097-949-42-87.

Довнар Александр Иосифович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіоелектронних і біомедицинських комп'ютеризованих засобів і технологій (502) Національного аерокосмічного університету ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ». Адрес: Україна, 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17. E-mail: dov-alexandr@uandex.ru, тел.: +38 067-575-75-16.

УДК 004:681.2.08

DOI: 10.30837/0135-1710.2019.176.016

О.І. МИХАЛЬОВ, А.Ю. ЗИМОГЛЯД, А.І. ГУДА

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТОПОЛОГІЇ BUCK ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НАГРІВАЧЕМ У ВАКУУМІ

Для проведення досліджень в області створення функціональних покриттів була потрібна математична модель перетворювача Buck. Без правильної моделі практично неможливо побудувати систему управління для термічного випаровування металу у вакуумі.

1. Вступ

Роботи зі створення функціональних покриттів в вакуумі для керування швидкістю випаровування, а так само й для відтворюваності експериментів вимагають можливості керування потужністю випаровувача [1,2]. Слід зауважити, що поведінка електричного опору нагрівача вкрай нелінійна [3], що визвано одразу багатьма факторами. До цих факторів належать: зміна опору від окислення, зміна опору внаслідок дії Джоулевого тепла, зміна фазового стану нагрівача, хімічна взаємодія з металом, що випаровується, фазовий перехід та подальше випаровування металу, що знаходиться на самому випаровувачі.

На виробництві використовують нагрівачі з доволі товстого металу (1-3 мм), завдяки чому при керуванні характерний час встановлення потужності збільшується. Проте це викликає додаткові складності в живленні такого нагрівача, оскільки для нього потрібні токи 100-400 А [3, 4]. В лабораторних умовах, для дослідів використовуються нагрівачі товщиною не більше 0.1 мм [4, 5]. Через їх меншу теплову інертність характерний час встановлення менший, що ускладнює систему керування потужністю.

Багато сучасних систем живлення мають в своїй основі перетворювачі топології Buck, які є одними з найбільш придатних для використання з метою отримання контрольованого джерела живлення з меншою напругою та більшим струмом, ніж базове джерело живлення [5-7]. На теперішній час існують різні моделі таких систем [6, 8, 9]. Але ці моделі не у повному обсязі відображають нелінійні ефекти та переходи проміж режимами роботи нагрівача.

2. Постановка задачі дослідження

Виходячи зі сказаного вище, головною метою дослідження є створення моделі перетворювача топології Buck, який може бути використано для управління потужністю термічного нагрівача в вакуумі. Модель повинна бути придатною для використання у системі управління потужністю на основі мікроконтролеру. Тому для досягнення мети дослідження пропонується вирішити такі задачі:

- розробка моделі перетворювача топології Buck;
- розробка спрощеної моделі перетворювача;
- моделювання квазістаціонарного стану перетворювача;
- експериментальна перевірка результатів моделювання та розробка на її підставі апаратно-програмної системи управління.