

## Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317  
ISI (Dubai, UAE) = 1.582  
GIF (Australia) = 0.564  
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
ПИИЦ (Russia) = 3.939  
ESJI (KZ) = 8.771  
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630  
PIF (India) = 1.940  
IBI (India) = 4.260  
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

### International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2023 Issue: 03 Volume: 119

Published: 29.03.2023 <http://T-Science.org>

Issue

Article



**Mohiniso Hidirova**

Kimyo International University  
Teacher, Tashkent  
[mhidirova@yandex.ru](mailto:mhidirova@yandex.ru)

**Sadoqat Abdurahmanova**

Kimyo International University  
Master student  
Tashkent

## MODELING AND SYNTHESIS OF VOLTAGE REGULATORS FOR RENEWABLE ENERGY GENERATORS WITH DELAY ACCOUNTING

**Abstract:** The article deals with modeling a model of a voltage regulator for renewable energy generators with taking into account the delay. The results of the research made it possible to identify the main modes of the system's behavior: a trivial attractor, a stationary regime, limit cycles of the Poincaré type, dynamic chaos, destructive changes - the "black hole" effect. These models can be used to analyze the functioning of voltage regulators in transient and emergency modes.

**Key words:** controller, mathematical modeling, nonlinear dynamics, transfer function, energy, functional differential equations.

**Language:** Russian

**Citation:** Hidirova, M., & Abdurahmanova, S. (2023). Modeling and synthesis of voltage regulators for renewable energy generators with delay accounting. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 03 (119), 245-250.

**Soi:** <http://s-o-i.org/1.1/TAS-03-119-32> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2023.03.119.32>

**Scopus ASCC:** 2604.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

**Аннотация:** Рассмотрен вопрос разработки модели регулятора напряжения генераторов возобновляемой энергии с учетом запаздывания. Результаты исследований позволили выявить основные режимы поведения системы: тривиального аттрактора, стационарного режима, предельных циклов типа Пуанкаре, динамического хаоса, деструктивных изменений – эффект «черная дыра». Данные модели могут быть использованы для анализа функционирования регуляторов напряжения в переходных и аварийных режимах.

**Ключевые слова:** регулятор, математическое моделирование, нелинейная динамика, передаточная функция, энергия, функционально-дифференциальные уравнения.

#### Введение

Развитие альтернативных источников энергии становится в последнее время всё значимее и перспективнее [1-10]. Для повышения эффективности применения чистой энергии важно добиться устойчивого функционирования энергосистемы в условиях неопределенности генерации возобновляемой энергии, изменения

характеристик внешних и внутренних условий и факторов. Одной из важных проблем внедрения зелёной энергетики является низкое и нерегулируемое выходное напряжение генераторов альтернативных источников энергии, неустойчивость в работе при сильных пульсациях [1-4]. Преобразователи напряжения должны иметь высокий коэффициент усиления по напряжению,

## Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317  
ISI (Dubai, UAE) = 1.582  
GIF (Australia) = 0.564  
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
ПИИЦ (Russia) = 3.939  
ESJI (KZ) = 8.771  
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630  
PIF (India) = 1.940  
IBI (India) = 4.260  
OAJI (USA) = 0.350

низкие пульсации входного тока и высокий КПД. Обычный повышающий преобразователь был предложен для возобновляемых источников энергии; однако для достижения высокого коэффициента усиления по напряжению требуются большие рабочие циклы. Вышеупомянутое приводит к большим скачкам напряжения, проблемам со временем обратного восстановления диода и высоким потерям проводимости на активном переключателе из-за собственных сопротивлений [5]. В работе [6] предлагается повышающая схема с квадратичным коэффициентом преобразования и непоследовательной передачей мощности, состоящая из двух обычных повышающих преобразователей с двумя активными ключами, работающими с одинаковым рабочим циклом и в предлагаемой конфигурации используется передаточный конденсатор, чтобы избежать повторной обработки мощности между обоими преобразователями. Авторы работы [11] отмечают, что сложная модель энергосистемы может быть аппроксимирована более простыми моделями, что позволяет применить хорошо апробированную теорию оптимального управления линейными объектами. Исследователям удалось синтезировать эффективный комбинированный регулятор, состоящий из двух регуляторов, настроенных на работу при различных нагрузках. Но, несмотря на огромные успехи, все еще не созданы регуляторы, обладающие обобщающей и «думающей» способностью, особенно в условиях быстроизменяющейся энергетической и информационной среды [11-13].

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Классическая модель преобразователя напряжения в устройствах генерации возобновляемой энергии имеет вид [6]:

$$L \frac{di}{dt} = -(1 - u_{01})V + E;$$
$$C \frac{dV}{dt} = (1 - u_{01})i - \frac{V}{R}.$$

Здесь  $E$  – энергия источника питания,  $L$  – индуктивность катушки,  $i$  – ток,  $V$  – напряжение,  $C$  – ёмкость конденсатора,  $R$  – сопротивление резистора,  $u_{01} \in [0,1)$ .

Передаточную функцию преобразователя напряжения можно принять в следующем виде:

$$W(s) = \frac{\frac{V}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}.$$

Задача структурно-параметрической оптимизации (место включения, структура и настроечные параметры регулятора) является важной для качества и эффективного устойчивого функционирования энергосистемы в условиях неопределенности генерации возобновляемой энергии, изменения характеристик внешних и внутренних условий и факторов. Преобразователи напряжения обладают также запаздыванием, т.е. изменение выходной координаты начинается не одновременно с приложением воздействия, а спустя некоторое время  $\tau$ , что ухудшает их устойчивость и влияет на выбор структуры и параметров регулятора. Передаточную функцию преобразователя напряжения с учетом запаздывания можно принять в следующем виде:

$$W(s) = \frac{\frac{V}{LC} e^{-s\tau(t)}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}.$$

Таким образом, из-за накопления энергии в реактивных элементах, таких как индуктивности и ёмкости, в реальных системах могут наблюдаться запаздывания, что также влияет на характер переходных процессов при воздействиях (рис 1).

Для обеспечения постоянства напряжения в устройствах генерации возобновляемой энергии используются электронные регуляторы на микропроцессорной основе. ПИД-регуляторы нашли широкое применение в электронных регуляторах напряжения, где очень важно не допустить перенапряжений [13-15]. Передаточная функция ПИД-регулятора определяется выражением:

$$W(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{sK_d}{1+Ts},$$

где  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора, соответственно,  $T$  – постоянная времени дифференцирования.

Настройка коэффициентов ПИД-регулятора является не простой задачей, требуется определить коэффициенты для трех составляющих для достижения заданных требований по времени установления и перерегулирования. Авторы работы [16] заявляют об эффективности использования нейросетевого оптимизатора параметров ПИД-регулятора к колебаниям нагрузки и шуму. В структурах преобразования напряжений из-за своей простоты реализации и более низкой стоимости хорошо рекомендовал себя алгоритм Antlion Optimization (ALO) для ПИД-регулятора, который даёт гораздо лучшие результаты с более быстрой динамикой

## Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317  
ISI (Dubai, UAE) = 1.582  
GIF (Australia) = 0.564  
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
РИИЦ (Russia) = 3.939  
ESJI (KZ) = 8.771  
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630  
PIF (India) = 1.940  
IBI (India) = 4.260  
OAJI (USA) = 0.350

[17]. Адаптивный нейро-нечеткий (ANFIS) самонастраивающийся ПИД-регулятор, а также гибридные ПИД-регуляторы обладают эффективными характеристиками, позволяющими быстро и надежно следовать схеме опорного напряжения при внешних изменениях нагрузки, распределениях и неопределенности параметров [18-19]. Исследователи также рассматривают подход к синтезу систем управления для уравнений Ван дер Поля и Лоренца на основе динамических обучаемых многослойных нейронных сетей. Исследователи используют различные модели осцилляторов, таких как осцилляторы Ван дер Поля, Курамото, Вилсона-Коуэна, Лоренца, Росселя и других [20-21].

Однако, имеющиеся регуляторы с системами искусственного интеллекта не предназначены для осуществления сложных «мыслительных» процессов с временными взаимоотношениями, кооперативными процессами и комбинированными обратными связями в условиях неопределенности генерации возобновляемой энергии, изменения характеристик внешних и внутренних условий и факторов. Также необходимо отметить, что ни одна исследовательская группа в мире, которая пытается выращивать сознание на небологическом носителе, не приблизилась

сегодня к созданию искусственного интеллекта, который обладал бы одновременно всеми свойствами, которые присущи человеческому интеллекту. Б.Н. Хидировым были разработаны методы количественных исследований сложных колебательных регуляторных систем, позволяющих с единой позиции рассматривать широкий круг явлений, объединенных наличием регуляторной системы, среды регуляции, конкуренции, кооперации и комбинированной обратной связи [22]. Было введено понятие **ORASTA**, состоящее из *осциллятора-регулятора (OR)*, способного принимать, перерабатывать и передавать сигналы определенной природы, и активной среды с временной постоянной (*active system with time average – ASTA*), позволяющей осуществлять петлю обратной связи в системе за конечное время. Одна из основных идей при математическом моделировании «думающих» регуляторов заключается в центральном регулировании потоками информации на основе мультиосцилляторной **ORASTA**. *Осциллятор-регулятор (OR)* способен принимать, обрабатывать и передавать информационные сигналы. Здесь наиболее важным и детально не изученным является вопрос регуляторных механизмов обработки сигнала (ассоциация, индукция, дедукция, анализ, синтез, обобщение, конкретизация).

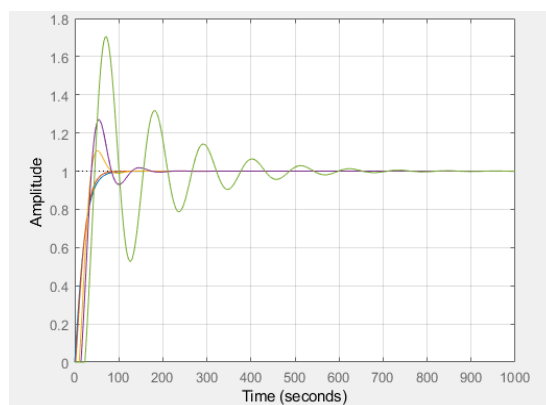


Рис. 1 Влияние запаздывания (задержки на 5с, 10с, 15с, 20с) на характер переходных процессов модели преобразователя напряжения с учетом запаздывания с обратной связью на входной сигнал в виде единичной ступеньки

Пусть в некотором ограниченном объеме существует  $N$  взаимосвязанных элементов – регуляторов, способных к восприятию, переработке и синтезу сигналов определенной природы. Пусть  $X_i(t)$  – величина безразмерная, характеризующая количество синтезируемого сигнала, соответствующего  $i$ -му элементу в момент времени  $t$  ( $1 \leq i, i \leq N$ ). Взаимосвязь между регуляторами осуществляется посредством сигналов со средним временем прохождения петли обратной связи  $h$  (т.е. временем,

прошедшим с момента образования сигналов до момента воздействия их (или их продуктов) на активность регуляторов). Требуется проведение анализа наиболее простейших закономерностей возникновения, развития и деформации осцилляторного фона при восприятии, переработке и синтезе смысловой информации данными элементами. Можно рассматривать регуляторные уравнения с запаздывающими аргументами, смешанные уравнения и уравнения типа пантографа:

## Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317  
ISI (Dubai, UAE) = 1.582  
GIF (Australia) = 0.564  
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
РИИЦ (Russia) = 3.939  
ESJI (KZ) = 8.771  
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630  
PIF (India) = 1.940  
IBI (India) = 4.260  
OAJI (USA) = 0.350

1. Функционально-дифференциальные уравнения регуляtorики с запаздыванием

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = a_i \left( \prod_{k=1}^n X_k(t-h) \right) e^{-\sum_{k=1}^n \delta_{ik} X_k(t-h)} - b_i X_i(t)$$

2. Функционально-дифференциальные уравнения регуляtorики с запаздыванием и опережением

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = a_i \left( \prod_{k=1}^n X_k(t-h) X_k(t+h) \right) e^{-\sum_{k=1}^n \delta_{ik} X_k(t-h) X_k(t+h)} - b_i X_i(t)$$

3. Функционально-дифференциальные уравнения регуляtorики со сжатием и растяжением

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = a_i \left( \prod_{k=1}^n X_k(th) \right) e^{-\sum_{k=1}^n \delta_{ik} X_k(th)} - b_i X_i(t)$$

Для исследования вопросов самоорганизации, саморегуляции и адаптации регуляторов для достижения устойчивого функционирования в процессе обработки внешних и внутренних информационных потоков необходимо изучение ассоциативных, взаимосопряженных и самосопряженных регуляторных связей между элементами системы.

Таким образом, для моделирования нейро-регуляторов на основе осцилляторных рекуррентных нейронных сетей наиболее оправданным и актуальным является построение их с помощью систем функционально-дифференциальных уравнений с памятью, поскольку они обладают «врожденными» колебательными режимами и позволяют учитывать временные взаимоотношения, то есть принимается решение как с учетом текущих входных данных, так и входных данных, полученных ранее с функцией саморегуляции.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, используя методику регуляtorики построен нейро-регулятор с учетом временных взаимоотношений, кооперативных процессов и комбинированных обратных связей на базе функционально-дифференциальных уравнений с запаздыванием [22]. Компьютерные исследования позволяют оперативно оценивать общую закономерность, характерные черты и основные режимы поведения решений. Они

позволяют получать приближенные решения нелинейных функционально-дифференциальных уравнений регуляtorики, оценивать поведение нерегулярных решений и уровень их «хаотичности», проводить анализ закономерностей процессов извлечения смысла из информационного потока путем «вычислительных экспериментов» для устойчивого функционирования энергосистемы в условиях неопределенности генерации возобновляемой энергии. При исследовании наиболее основных механизмов функционирования регуляторов при извлечении смысла из принятого огромного количества информации, сортировки и обработки «полезной» и «вредоносной» информации выявлено, что данные процессы реализуются посредством сложных циклических регуляторных механизмов путем выявления связей между сигналами, выделения основных частот колебаний и распределения энергии по частотам. Разработанное программное средство допускает изменение значений параметров, детализацию и временную остановку для архивизации визуального материала. На основе качественных исследований модельных уравнений регуляторов показано что, при отсутствии нетривиального положения равновесия, тривиальное положение равновесия устойчиво, при пересечении бифуркационной точки, происходит мягкое возбуждение системы и переход в устойчивое нетривиальное положение равновесия. Дальнейший рост точки бифуркации может привести к потере устойчивости и появлению колебаний вокруг нетривиального положения равновесия у модельного уравнения (рис. 2).

На основе результатов качественных исследований и вычислительных экспериментов возможно построение параметрического портрета модельных систем нейро-регулятора с выделением конкретных областей однотипного поведения: тривиального аттрактора, стационарного режима, предельных циклов типа Пуанкаре, динамического хаоса, деструктивных изменений – «черная дыра» с целью анализа закономерностей функционирования рассматриваемой системы при переходных и аварийных ситуациях.

## Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317  
ISI (Dubai, UAE) = 1.582  
GIF (Australia) = 0.564  
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
РИИЦ (Russia) = 3.939  
ESJI (KZ) = 8.771  
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630  
PIF (India) = 1.940  
IBI (India) = 4.260  
OAJI (USA) = 0.350

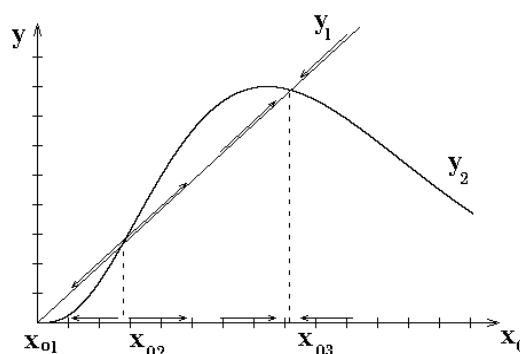


Рис. 2. Существование аттрактора у модельной системы регулятора

$$(y_1 = x, y_2 = (a/b)x^2 \exp(2(1-x)))$$

Более подробное изложение результатов моделирования электронных нейро-регуляторов напряжения мехатронных систем с учетом запаздывания планируется в последующих публикациях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для моделирования электронных регуляторов напряжения генераторов альтернативных источников энергии с учетом запаздывания наиболее оправданным и актуальным является использование хаотических искусственных нейронных сетей со сложной

функцией активации с самообучением и обобщением. Особенно это актуально при разработке энергетических систем в условиях неустойчивости в работе при сильных пульсациях и когда очень важны вопросы экологии, безопасности и эффективности. Созданную нейронную сеть необходимо не обучать, а образовывать, то есть формировать навыки иерархически оперировать понятиями экологичности, безопасности и эффективности при центральном регулировании потоками энергии и информации.

### References:

1. Singh, K.A., & Chaudhary, K. (2021). Design and development of a new three-phase AC-DC single-stage wind energy conversion system. *IET Power Electron.* 2021, 14, 302-312.
2. Anand, A., & Singh, B. (2018). *Cuk-SEPIC based bridgeless PFC dual output converter fed SRM drive*. India International Conference on Power Electronics, IICPE 2018, 1- 7.
3. Lin, X., & Wang, F. (2018). AC-DC bridgeless buck converter with high PFC performance by inherently reduced dead zones. *IET Power Electron.* 11(9), 1- 7.
4. Tang, Y., & Khaligh, A. (2016). A multiinput bridgeless resonant AC-DC converter for electromagnetic energy harvesting. *IEEE Trans. Power Electron.* 31(3), 2254- 2263.
5. Arshian, Sh., Sinem, K., Hafizah, H.A.K., Gizem, U., & Sunil, T. (2023). Demystifying the links between green technology innovation, economic growth, and environmental tax in ASEAN-6 countries: The dynamic role of green energy and green investment, *Gondwana Research*, Volume 115, 2023, 98-106.
6. Diaz-Saldierna, L.H., & Leyva-Ramos, J. (2021). High Step-Up Converter Based on Non-Series Energy Transfer Structure for Renewable Power Applications. *Micromachines* 2021, 12, 689.
7. Adila, F., Haidar, A.M.A., Abdullah, M.O., & Narottam, D. (2023). Smart grid mechanism for green energy management: A comprehensive review. *International Journal of Green Energy*, 20:3, 284-308.
8. Mansour, A.S., & Zaky, M.S. (2023). A new extended single-switch high gain DC-DC boost converter for renewable energy applications. *Sci Rep* 13, 264.
9. Diaz-Saldierna, L.H., & Leyva-Ramos, J. (2021). High Step-Up Converter Based on Non-Series Energy Transfer Structure for Renewable Power Applications. *Micromachines* 2021, 12, 689.

**Impact Factor:**

**ISRA (India) = 6.317**  
**ISI (Dubai, UAE) = 1.582**  
**GIF (Australia) = 0.564**  
**JIF = 1.500**

**SIS (USA) = 0.912**  
**PIHII (Russia) = 3.939**  
**ESJI (KZ) = 8.771**  
**SJIF (Morocco) = 7.184**

**ICV (Poland) = 6.630**  
**PIF (India) = 1.940**  
**IBI (India) = 4.260**  
**OAJI (USA) = 0.350**

10. Hasanpour, S., Baghrarian, A., & Mojallali, H. (2019). A Modified SEPIC-Based High Step-Up DC-DC Converter with Quasi-Resonant Operation for Renewable Energy Applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2019, 66, 3539-3549.
11. Rulevskiy, V.M., Bukreev, V.G., & Shandarova, E.B. (2018). Creating of a Suboptimal Voltage Regulator in the Power Supply of the Deep-Water Vehicle. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy [Electrotechnical Systems and Complexes]*, no. 3(40), pp. 47-54. (In Russian).
12. Fang, M., Zhuo, Y., & Lee, Z. (2010). The application of the self-tuning neural network PID controller on the ship roll reduction in random waves. *Ocean Engineering*, №. 37, pp.529-538.
13. Ghamari, S.M., Narm, H.G., & Mollae, H. (2022). Fractional-order fuzzy PID controller design on buck converter with Antlion Optimization Algorithm. *IET Control Theory Appl.* 16, 340- 352.
14. Abdelfattah, H., Kotb, S., Esmail, M., & Mosaad, M. (2022). Adaptive Neuro-Fuzzy Self Tuned-PID Controller for Stabilization of Core Power in a Pressurized Water Reactor. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 3(1), 1-18.
15. Mehmet, H.D., & Berkay, E. (2022). Output voltage control of double chambers microbial fuel cell using intelligence-based optimized adaptive neuro fuzzy inference controller. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47. Issue 45, pp.19837-19849.
16. Fang, M., Zhuo, Y., & Lee, Z. (2010). The application of the self-tuning neural network PID controller on the ship roll reduction in random waves. *Ocean Engineering*, №. 37, pp.529-538.
17. Ghamari, S.M., Narm, H.G., & Mollae, H. (2022). Fractional-order fuzzy PID controller design on buck converter with Antlion Optimization Algorithm. *IET Control Theory Appl.* 16, 340- 352.
18. Abdelfattah, H., Kotb, S., Esmail, M., & Mosaad, M. (2022). Adaptive Neuro-Fuzzy Self Tuned-PID Controller for Stabilization of Core Power in a Pressurized Water Reactor. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 3(1), 1-18.
19. Mehmet, H.D., & Berkay, E. (2022). Output voltage control of double chambers microbial fuel cell using intelligence-based optimized adaptive neuro fuzzy inference controller. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47. Issue 45, pp.19837-19849.
20. Terehov, V. A., & Nikonov, A. N. (2010). Sintez nejroreguljatora nelinejnyh dinamicheskijh ob#ektov na osnove odnoj modeli bifurkacij. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*, №1, pp.31-42.
21. Borisuk, G. N., Borisuk, R. M., Kazanovich, Ja. B., Luzjanina, T. B., Turova, T. S., & Cymbaluk, G. S. (1992). "Oscilljatornye nejronnye seti. Matematicheskie rezul'taty i prilozhenija", *Matem. modelirovanie*, 4:1 (1992), 3-43.
22. Hidirov, B.N. (2014). *Izbrannye raboty po matematicheskomu modelirovanju reguljatoriki zhivyh sistem.* (p.304). Moskva - Izhevsk.