

Научная статья

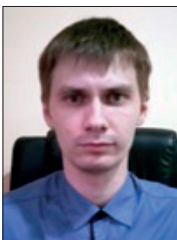
УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-145-152

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ПОСРЕДСТВОМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MATLAB SIMULINK

**Рустам Нуриманович Хамитов****Rustam N. Khamitov**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника»,  
Омский государственный технический университет, Омск, Россия;  
профессор кафедры «Электроэнергетика», Тюменский индустриальный  
университет, Тюмень, Россия

**Павел Витальевич Зыкин****Pavel V. Zykin**

аспирант кафедры «Электроэнергетика»,  
Тюменский индустриальный университет,  
Тюмень, Россия

### Актуальность

Процесс осуществления технологических процессов обработки детали резанием постоянно усложняется. Это связано с тем, что в результате чаще всего требуется получить деталь сложнопрофильной формы, а ее поверхности должны соответствовать высокому качеству точности с минимальной погрешностью. Процесс точения сложных деталей реализуется в условиях применения недетерминированных показателей резания. Для того чтобы управлять и оказывать влияние на их изменения целесообразно применить специализированную систему управления шероховатостью.

### Цель исследования

Разработать систему управления шероховатостью на основе нечеткой логики при помощи программного пакета MATLAB SIMULINK.

### Методы исследования

Для разработки системы управления применены методы компьютерного автоматизированного моделирования. В частности, использовался программный пакет MATLAB SIMULINK.

### Результаты

В рамках выполненного исследования посредством MATLAB SIMULINK синтезирована система управления показателями шероховатости при обработке детали резанием на токарном станке с числовым программным управлением (ЧПУ). Смоделированный процесс работы системы показал эффективность ее применения,

### Ключевые слова

система управления  
шероховатостью,  
функции принадлежности,  
шероховатость,  
погрешность измерений

которая выражается в точном получении требуемых параметров шероховатости при обработке детали. Требуемые значения достигаются за счет регулирования привода продольной подачи и скорости движения режущего инструмента.

**Для цитирования:** Хамитов Р. Н., Зыкин П. В. Синтез системы управления шероховатостью на основе нечеткой логики посредством программного пакета MATLAB SIMULINK // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 145-152. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-145-152>.

Original article

## SYNTHESIS OF FUZZY LOGIC ROUGHNESS CONTROL SYSTEM BY MATLAB SIMULINK SOFTWARE PACKAGE

### Relevance

The process of processing a part by cutting is constantly complicated. This is due to the fact that as a result, it is most often necessary to obtain a part of difficult profile shape, and its surfaces must correspond to a high quality of accuracy with a minimum error. The process of turning complex parts is implemented under the conditions of using undetected cutting indicators. In order to control and influence their changes, it is advisable to use a specialized roughness control system.

### Aim of research

The main aims of the research develop a fuzzy logic roughness management system using the MATLAB SIMULINK software package.

### Research methods

To achieve computer-automated modeling, control system development methods were used. In particular, the MATLAB SIMULINK software package was used.

### Results

As part of the study, MATLAB SIMULINK synthesized a system for controlling roughness when machining a part with a CNC lathe. The simulated process of the system has shown the effectiveness of its application, which is expressed in the accurate receipt of the required roughness parameters during part processing. The required values are achieved by adjusting the longitudinal feed drive and the speed of the cutting tool.

### Keywords

roughness control system, belonging functions, roughness, measurement error

**For citation:** Khamitov R. N., Zykin P. V. Sintez sistemy upravleniya sherokhovatost'yu na osnove nechetkoi logiki posredstvom programmno paketa MATLAB SIMULINK [Synthesis of Fuzzy Logic Roughness Control System by MATLAB SIMULINK Software Package]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 145-152 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-145-152>.

### Введение

Реализация технологических процессов обработки деталей резанием постоянно усложняется, так как чаще всего в результате необходимо получить деталь сложнопрофильной формы, поверхности которой должны соответствовать высокому качеству точности [1].

Обработка подобных деталей выполняется в условиях использования недетерминированных показателей резания, таких как шероховатость, сила резания, скорость резания, управлять и регулировать которые без применения системы автоматического управления (САУ) не представляется возможным. Несоответ-

ствие значений показателей резания в ходе реализации технологического процесса влечет за собой увеличение величины погрешности точения, что в конечном итоге отразится на качестве обработки детали в виде отклонения полученной шероховатости от требуемого значения [2]. Возникает описываемая ситуация по причине того, что при скорости резания 30–35 м/мин начинает развиваться процесс наростообразования. Для наглядности он представлен в виде графика на рисунке 1.

Анализируя график, можно заметить, что при скорости главного движения резания более 30 м/мин из-за возрастания температуры в зоне резания процесс наростообразования прекращается, следовательно, величина шероховатости уменьшается [3]. Для стабилизации показателей до требуемых величин необходимо регулирование таких параметров резания, как подача режущего инструмента и скорость движения режущего инструмента. Наиболее эффективный способ регулирования — это применение в процессе обработки автоматизированной системы управления шероховатостью [4].

### Синтез системы управления шероховатостью на основе нечеткой логики

Процесс проектирования системы управления состоит из нескольких взаимосвязанных этапов. На начальном этапе работы важно правильно подобрать комбинацию термов функции принадлежности, на основе которой будет функционировать система управления [5]. Для решения поставленной задачи наиболее эффективно использовать функции принадлежности из трех термов [6]: Z (норма) — имеет гауссовскую форму, N — (отрицательные значения) и P — (положительные значения), данные термы имеют сигмоидальную форму.

При настройке функции Гаусса задаются следующие параметры. Центр нечеткого множества равен нулю, а среднеквадратичное отклонение равно 0,3. Необходимое уравнение представлено в виде зависимости (1) [7]:

$$\text{gaussmf}(x, \sigma, c) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}. \quad (1)$$

Параметры сигмоидальных функций заданы следующие: крутизна функции равна  $\pm 2,5$ , а координата пересечения сигмоидальных функций равна 0.

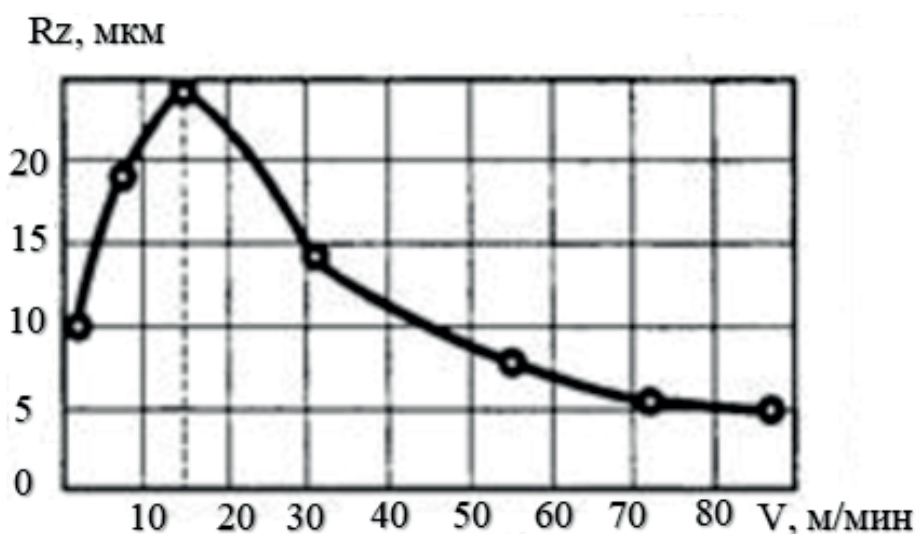


Рисунок 1. График наростообразования на резце в процессе обработки детали резанием

Figure 1. Graph of buildup on the cutter during part cutting

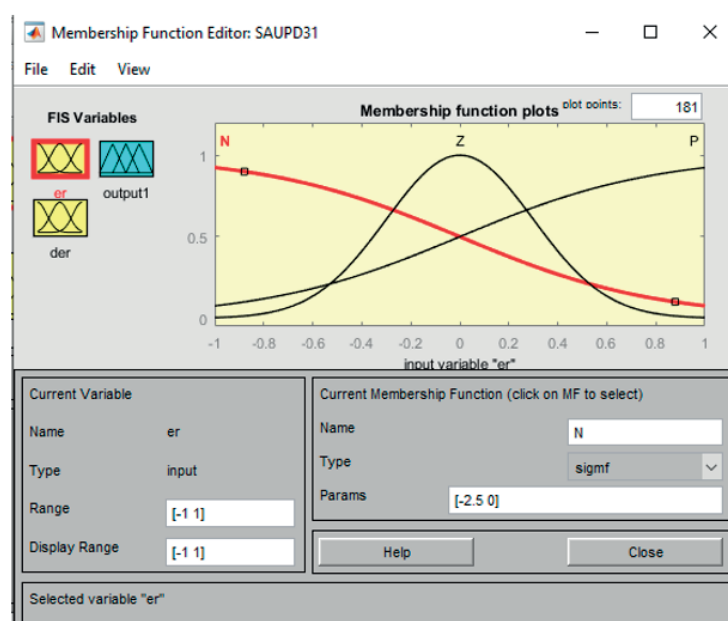
Таким образом, графики функции принадлежности входа и выхода имеют вид, который представлен на рисунке 2.

На основании функции принадлежности получена поверхность отклика на основе трех термов. Результат представлен на рисунке 3.

Таким образом, принципиальная схема самой модели и проведенные в ней настройки представлены на рисунке 4.

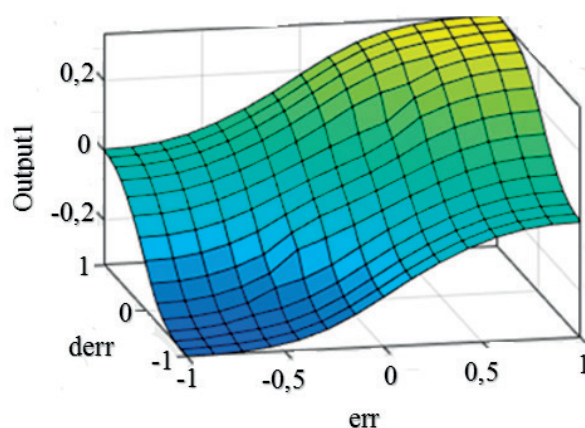
Принцип действия системы управления заключается в следующем: исходная величина шероховатости  $R_a$ , задаваемая

элементом «Constant1», элементом «Расчет подачи», пересчитывается в величину подачи  $S$ , формируя величину входного сигнала для системы управления. После чего свои функции выполняет регулятор на нечеткой логике «Fuzzy Logic Controller», который имеет два входа. На первый подается величина рассогласования, на второй — его производная. Величина производной вычисляется посредством блока «Transfer Function1», который выполняет операцию



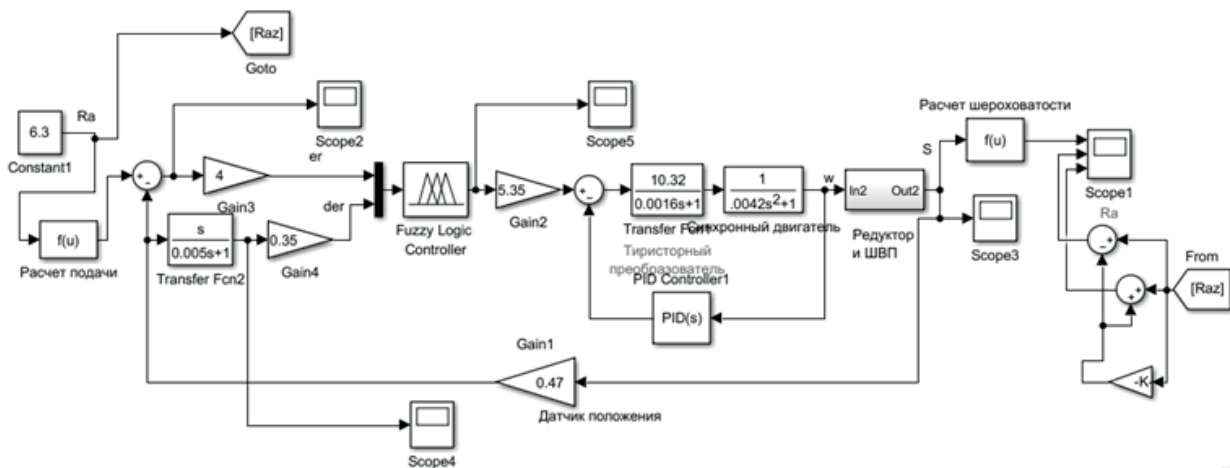
**Рисунок 2.** Функции принадлежности, состоящие из трех термов:  
Z — гауссовой формы, N и P — сигмоидальные

**Figure 2.** Belonging functions consisting of three terms:  
Z — Gaussian form, N and P — sigmoidal



**Рисунок 3.** Поверхность отклика для функций принадлежности, состоящих из трех термов

**Figure 3.** Response surface for three-term belonging functions



**Рисунок 4.** Принципиальная схема модели системы управления шероховатости с настройками для функций принадлежности, состоящих из трех термов

**Figure 4.** Schematic diagram of roughness control system model with settings for belonging functions consisting of three terms

дифференцирования с передаточной функцией [8]:

$$W_{PD}(p) = \frac{p}{T_{\phi}p + 1}, \quad (2)$$

где  $T_{\phi}$  — постоянная времени фильтра равная  $T_{\phi} = 0,005$  с.

В системе управления предусмотрены масштабирующие усилители «Gain2» и «Gain4», осуществляющие нормализацию сигналов по формулам (3), (4) [2]:

$$k_{err} = \frac{1}{err_{max}}; \text{ и } k_{derr} = \frac{1}{derr_{max}}, \quad (3)$$

где  $err_{max}$  и  $derr_{max}$  — соответственно максимальные значения сигнала рассогласования и его производной [9].

Наличие усилителей позволяет системе управления в процессе работы нормализовать величины сигналов на входах нечеткого регулятора до значения  $\pm 1$ .

Элемент «Gain2» выполняет функцию денормализации сигнала при помощи математической зависимости:

$$k_{вых} = \max |u_{вых}|. \quad (4)$$

Сигнал на выходе нечеткого регулятора после процесса денормализации передается на многокомпонентную модель объекта управления, которая включает в себя элементы «Синхронный двигатель» и «Тиристорный преобразо-

ватель», а также последовательно включенные элементы системы «ШВП» и «Редуктор». Стоит отметить, что блоки «Синхронный двигатель» и «Тиристорный преобразователь» охвачены обратной связью через PID регулятор», образуя внешний контур регулирования скорости электродвигателя.

Для регулирования показателей скорости электродвигателя использовалась соответствующая передаточная функция:

$$W_{\omega}(p) = \frac{1}{T_{\omega}^2 \cdot p^2 + 1}, \quad (5)$$

где  $T_{\omega}$  — электромеханическая постоянная времени. В процессе расчета величину электромеханической постоянной примем равной 0,0649 с.

Силовой преобразователь представлен в качестве управляющего устройства двигателем и выполняет свои функции посредством передаточной функции:

$$W_{cn}(p) = \frac{k_{cn}}{T_{cn} \cdot p + 1}, \quad (6)$$

где  $k_{cn}$  — коэффициент синхронного привода ( $k_{cn} = 10,32$ );

$T_{cn}$  — электромеханическая постоянная синхронного привода ( $T_{cn} = 0,0016$ ).

Далее выполняется регулирование скорости движения режущего инстру-

мента, которое осуществляется посредством передаточной функции:

$$W_{\text{РиШВП}}(p) = W_{\text{мн}}(p) \cdot W_{\text{вн}}(p) = \frac{K_{\text{мн}}}{T_{\text{мн}} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{\text{вн}}}{T_{\text{вн}} \cdot p + 1}, \quad (7)$$

где  $K_{\text{мн}}$  — коэффициент механической передачи ( $K_{\text{мн}} = 5$ );

$K_{\text{вн}}$  — коэффициент винтовой пары ( $K_{\text{вн}} = 0,1$ );

$T_{\text{мн}}$  — постоянная времени механической передачи ( $T_{\text{мн}} = 4 \cdot 10^{-4}$ );

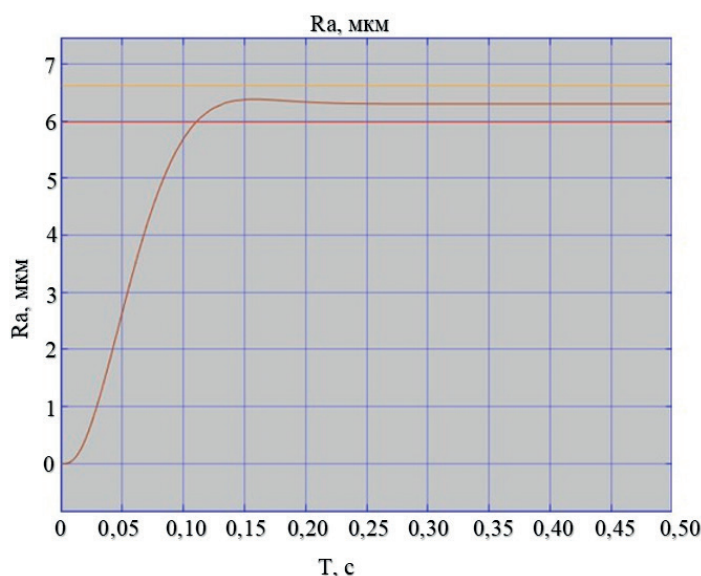
$T_{\text{вн}}$  — постоянная времени винтовой пары ( $T_{\text{вн}} = 3 \cdot 10^{-4}$ ).

Имея математическое описание функционирования системы управления шероховатости, ее структурную схему, алгоритм функционирования каждого отдельного элемента САУ важно оце-

нить корректность и эффективность ее функционирования. Результат функционирования системы управления представлен в виде графика переходного процесса, который показан на рисунке 5.

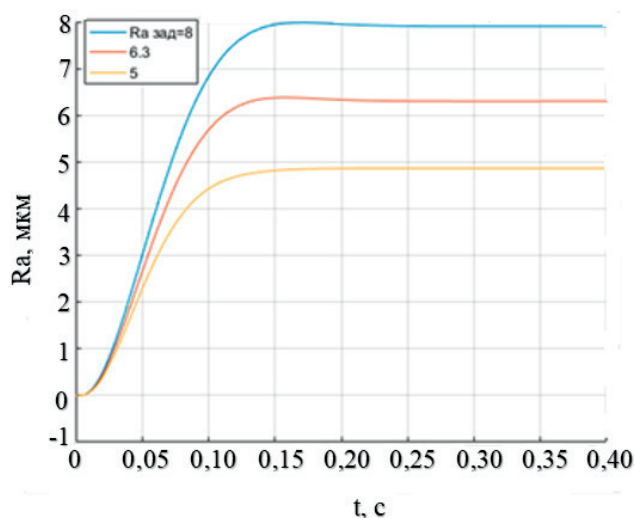
Оценивая представленный на рисунке 5 график, можно заметить, что спроектированная система управления имеет время переходного процесса, равное 0,11 с.

На рисунке 6 представлены кривые для трех величин заданной шероховатости  $Ra_{\text{зад}} = 5-8$  мкм, причем предварительная настройка коэффициентов  $k_{\text{err}} = 4$ ,  $k_{\text{derr}} = 0,35$ ,  $k_{\text{вых}} = 5,35$  обеспечила точную отработку системой управления величины шероховатости  $Ra = 6,3$  и  $Ra = 8$ . График переходного процесса представлен на рисунке 6.



**Рисунок 5.** График переходного процесса при  $Ra_{\text{зад}} = 6,3$  мкм

**Figure 5.** Transient plot at  $Ra_{\text{зад}} = 6.3 \mu\text{m}$



**Рисунок 6.** Переходный процесс при разных значениях  $Ra_{\text{зад}}$  при настройках, обеспечивающих отсутствие перерегулирования

**Figure 6.** Transient at different values of  $Ra_{\text{зад}}$  at settings ensuring no overregulation

Стоит отметить, что при  $R_a = 5$  в работе системы управления возникает статическая ошибка. Ее величина составляет:

$$\frac{(5 - 4,877)}{5} \cdot 100 = 2,7 \, \%$$

Значение данной статической ошибки показывает, что система управления функционирует корректно.

## Выводы

В рамках выполненного исследования посредством MATLAB SIMULINK син-

тезирована система управления показателями шероховатости при обработке детали резанием на токарном станке с числовым программным управлением. Смоделированный процесс работы системы показал эффективность ее применения, которая выражается в точном получении требуемых параметров шероховатости при обработке детали. Требуемые значения достигаются за счет регулирования привода продольной подачи и скорости движения режущего инструмента.

## Список источников

1. Гаврилова С.В. Улучшение динамических характеристик электротехнического многодвигательного судоподъемного комплекса «СЛИП»: дис. ...канд. техн. наук. Ульяновск, 2019. 138 с.
2. Ansari J., Reza Abbasi A., Bahmani Firouzi B. Decentralized LMI-Based Event-Triggered Integral Sliding Mode LFC of Power Systems with Disturbance Observer // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2022. Vol. 138. P. 107971. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.107971>.
3. Agha Kashkooli M.R., Jovanović M.G. Parameter Independent Control of Doubly-Fed Reluctance Wind Generators without a Rotor Position Sensor // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2022. Vol. 137. P. 107778. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107778>.
4. Li D., Deng X., Li C., Zhang X., Fang E. Study on the Space Vector Modulation Strategy of Matrix Converter under Abnormal Input Condition // *Alexandria Engineering Journal*. 2022. No. 61(6). P. 4595–4605. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.020>.
5. Хамитов Р.Н., Зыкин П.В., Глазырин А.С. Разработка нечеткой системы управления приводом продольной подачи токарного станка с ЧПУ на основе совместно используемых функций принадлежности // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2021. Т. 17, № 3-4. С. 82–91. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-82-91. EDN:BHNAEE.
6. Enayati M., Derakhshan G., Hakimi S.M. Optimal Energy Scheduling of Storage-Based Residential Energy Hub Considering Smart Participation of Demand Side // *Journal of Energy*

Storage. 2022. Vol. 49. P. 104062. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104062>.

7. Hassan Q., Jaszczur M., Abdulateef A.M., Abdula-teef J., Hasan A., Mohamad A. An Analysis of Photovoltaic/Supercapacitor Energy System for Improving Self-Consumption and Self-Sufficiency // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 680–695. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.021>.
8. Li J., Ma J., Sun L., Liu X., Liao H., He D. Mechanistic Insight into the Biofilm Formation and Process Performance of a Passive Aeration Ditch (PAD) for Decentralized Wastewater Treatment // *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 2022. Vol. 16 (7). P. 86. <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1494-3>.
9. Брюханов В.Н., Косов М.Г. и др. Теория автоматического управления / Под ред. М.Ю. Соломенцева. М.: Высшая школа, 2018. 268 с.

## References

1. Gavrilova S.V. *Uluchshenie dinamicheskikh kharakteristik elektrotekhnicheskogo mnogodvigatel'nogo sudopod'emnogo kompleksa «SLIP»: dis. ...kand. tekhn. nauk* [Improvement of Dynamic Characteristics of the Electrical Multi-Engine Ship Lifting System «SLIP». Kand. Tech. Diss.]. Ul'yanovsk, 2019. 138 p. [in Russian].
2. Ansari J., Reza Abbasi A., Bahmani Firouzi B. Decentralized LMI-Based Event-Triggered Integral Sliding Mode LFC of Power Systems with Disturbance Observer. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022, Vol. 138, pp. 107971. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.107971>.
3. Agha Kashkooli M.R., Jovanović M.G. Parameter Independent Control of Doubly-Fed Reluctance Wind Generators without a Rotor Position Sensor. *International Journal of Electrical*

*Power and Energy Systems*, 2022, Vol. 137, pp. 107778. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107778>.

4. Li D., Deng X., Li C., Zhang X., Fang E. Study on the Space Vector Modulation Strategy of Matrix Converter under Abnormal Input Condition. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, No. 61(6), pp. 4595–4605. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.020>.

5. Khamitov R.N., Zykin P.V., Glazyrin A.S. Razrabotka nechetkoi sistemy upravleniya privodom prodol'noi podachi tokarnogo stanka s ChPU na osnove sovместno ispol'zuemykh funktsii prinadlezhnosti [Development of Fuzzy CNC Lathe Drive Control System Based on Shared Accessory Functions]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, Vol. 17, No. 3–4, pp. 82–91. doi: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-82-91. EDN: BHNAEE. [in Russian].

6. Enayati M., Derakhshan G., Hakimi S.M. Optimal Energy Scheduling of Storage-Based

Residential Energy Hub Considering Smart Participation of Demand Side. *Journal of Energy Storage*, 2022, Vol. 49, pp. 104062. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104062>.

7. Hassan Q., Jaszczur M., Abdulateef A.M., Abdula-teef J., Hasan A., Mohamad A. An Analysis of Photovoltaic/Supercapacitor Energy System for Improving Self-Consumption and Self-Sufficiency. *Energy Reports*, 2022, Vol. 8, pp. 680–695. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.021>.

8. Li J., Ma J., Sun L., Liu X., Liao H., He D. Mechanistic Insight into the Biofilm Formation and Process Performance of a Passive Aeration Ditch (PAD) for Decentralized Wastewater Treatment. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2022, Vol. 16 (7), pp. 86. <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1494-3>.

9. Bryukhanov V.N., Kosov M.G. e.a. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2018. 268 p. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 25.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023; принята к публикации 09.10.2023.*

*The article was submitted 25.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023; accepted for publication 09.10.2023.*