

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ПЛОДОВООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ В ВИРТУАЛЬНОЙ СИМУЛЯЦИОННОЙ СРЕДЕ

**Н. И. Лебедь**

*Кафедра «Электроснабжение и энергетические системы», nik8872@yandex.ru;  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет»,  
Волгоград, Россия*

**Ключевые слова:** автоматизация; автоматизированный электропривод; измельчитель; микроконтроллеры; ножевой аппарат; плодовоовощная продукция; резание.

**Аннотация:** Разработан измельчитель плодовоовощной продукции, к преимуществам которого относится высокая производительность при минимальных энергозатратах. Предложена система микропроцессорного управления измельчителем на основе аппаратной платформы программируемого микроконтроллера ATmega 328.

Смоделирована в облачной среде система управления автоматизированного электропривода измельчителя с применением языков программирования FBD и C++. Подобран список компонентов электрической схемы системы управления, построена графическая схема программного кода, а также показан список тэгов (входы, выходы, переменные). Проведена проверка системы на работоспособность в виртуальной симуляционной облачно-отладочной среде Autodesk Circuitson on Tinkercad, доказавшая ее работоспособность и эффективность.

---

### Введение

Наиболее значимыми факторами, оказывающими важнейшее влияние на отрасль перерабатывающей промышленности, в частности производство продуктов из плодов и овощей, является эффективность применяемых технологий в совокупности с техническими средствами для их реализации [1].

При хранении плодов и овощей потери урожая составляет от 20 до 30 %. Транспортировке свежих плодов и овощей с минимальными потерями в отдаленные регионы страны препятствуют значительные расстояния и плохое качество дорожной сети. При этом комплексная переработка 1 млн т плодовоовощного сырья на пищевые продукты с минимальным количеством отходов позволяет уменьшить потери его при хранении на 83 тыс. т [2].

Также следует отметить, что в отраслях АПК России работают только 4 % техники, удовлетворяющей современным международным требованиям и стандартам. Способами обновления техники должны быть повсеместная автоматизация существующей и внедрение новой роботизированной техники, что делает актуальным применение способов разработки систем автоматизации посредством виртуальной симуляционной среды, позволяющей проводить проверку на работоспособность и моделирование в условиях, идентичных реальным.

## Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследований для разработки схемы автоматизации выбран разработанный ранее измельчитель плодовоовощной продукции [3] (рис. 1).

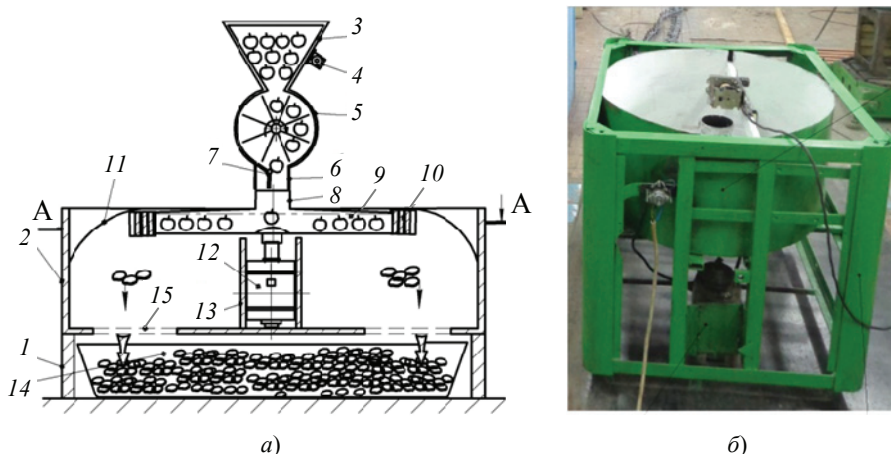
Устройство содержит опоры 1, цилиндрический корпус 2, закрепленный на нем загрузочный бункер 3 с вибратором-встряхивателем 4, дозатор барабанного типа 5, имеющий в нижней горловине 6 перекидной клапан 7, центробежный ротор 8 с тремя направляющими трубами 9, расположенными под углом  $120^\circ$  относительно друг друга, на концах которых установлены сменные ножевые стенки 10 с ножами, расположенными зигзагообразно, отражатели 11, электродвигатель 12, защитный кожух 13, емкость для сбора измельченного продукта 14, расположенная под выгрузными отверстиями 15 цилиндрического корпуса 2.

Устройство работает следующим образом.

Перед загрузкой материала запускали электродвигатель 12 устройства, чтобы задать центробежному ротору 8 необходимую частоту вращения. Обрабатываемый материал через загрузочный бункер 3 и дозатор барабанного типа 5 поступал в центробежный ротор 8. Посредством передачи крутящего момента валом электродвигателя 12 центробежный ротор 8 равномерно распределял плодовоовощной материал по трем направляющим трубам 9. В результате центробежной силы материал удалялся из направляющих труб 9 через ножи ножевых стенок 10 с линейной скоростью, необходимой для полного разрезания. При этом плодовоовощной материал проникал сквозь ножи, измельчался на ломтики необходимой толщины и далее через отражатели 11 и выгрузное отверстие 15 поступал в емкость для сбора измельченного материала 14 [4].

Проведенные ранее исследования были направлены на снижение энергоемкости измельчения и повышения качества готовой обработанной продукции [5]. Недостатком данного измельчителя было отсутствие системы управления и автоматизации электроприводом, что провоцировало дополнительные затраты за счет контроля и ручного управления при работе с устройством со стороны закрепленного оператора.

Так, при реализации рабочего режима измельчителя необходимо запускать сначала основной привод (ротора) и при достижении нужной частоты вращения через 2...8 с приводить в действие привод дозатора. Для отключения измельчителя и выхода из рабочего режима порядок обратный: вначале отключали привод



**Рис. 1. Измельчитель плодовоовощной продукции [3]:**  
а – схематичный вид; б – изготовленная экспериментальная установка

дозатора и через 2...8 с основной привод (ротора). Такая схема выключения была обусловлена исключением перегрузок ротора и полным измельчением всего обрабатываемого плодовоовощного сырья, находящегося в трубах ротора, а также удалением ломтиков из межножевого пространства ножевого аппарата. Кроме этого отсутствовала возможность отладки ряда режимов работы измельчителя, в частности гибкого управления частотой вращения электродвигателей.

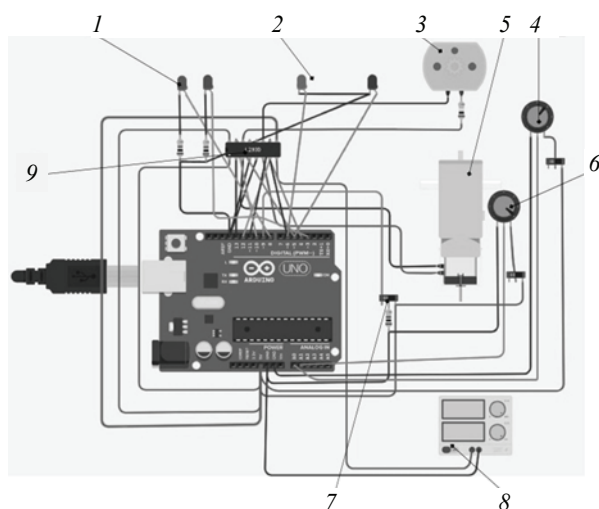
Для разработки и моделирования системы автоматизированного управления измельчителем использовалась симуляционная облачно-отладочная среда Autodesk Circuits on Tinkercad, где проводился подбор основных элементов системы управления и их подключение к микроконтроллеру. Разработка программного кода проекта проходила в системе графического программирования FLProg на языке FBD, далее проводилась проверка кода, затем преобразование кода на язык C++ и последующая компиляция в Arduino IDE [6]. Полученная программа загружалась в блок «Код» среды Autodesk Circuits on Tinkercad с предварительно созданной схемой системы автоматизированного управления измельчителем для последующей проверки на работоспособность и моделирования [7].

### Результаты исследований

На рисунке 2 представлены результаты виртуального моделирования автоматизированного привода измельчителя плодовоовощной продукции в симуляционной облачно-отладочной среде Autodesk Circuits on Tinkercad.

Имитационная схема включала: сигнальные лампы приводов при рабочем режиме 1, сигнальные лампы приводов при отладочном режиме 2, потенциометр 4 привода дозатора 3, основной привод 5, потенциометр 6 основного привода 5, программная кнопка пошагового включения/выключения 7, источник питания 8, драйвер двигателей 9.

Для построения схемы автоматизированного привода использовали имеющиеся виртуальные электронные компоненты указанной программы, в которую не входят источники и электродвигатели переменного тока. Так как для выполнения программы управления выбранным микроконтроллером ATmega 328 (Arduino-UNO) не принципиально различие между использованием постоянного или переменного



**Рис. 2. Результаты виртуального моделирования автоматизированного привода измельчителя плодовоовощной продукции в симуляционной облачно-отладочной среде Autodesk Circuits on Tinkercad**

тока, а также соответствующим им электроприборам, то вышеуказанную систему вполне можно протестировать на предлагаемой схеме (см. рис. 2) и в первом приближении рекомендовать для автоматизации разработанной ранее установки. В последующем схема будет дополнена соответствующими элементами: твердотельными реле (SSR AC), радиаторами для реле, шилдом управления мощной нагрузкой, электродвигателями переменного тока и др. [8, 9].

Для подключения электродвигателей к микроконтроллеру был использован драйвер двигателей 9 с H-мостом L293D, позволяющий управлять в широком диапазоне настроек двумя электродвигателями одновременно.

В качестве приводов для наглядности данной схемы, построенной в виртуальной симуляционной среде, использован мотор-редуктор – для основного привода 5 (ротора) и мотор постоянного тока с понижающим резистором для снижения частоты его вращения – для привода дозатора 3.

Мотор-редуктор и мотор постоянного тока подключены через драйвер 9 к цифровым выводам платы Arduino-UNO, а также ШИМ-выводам. Применение ШИМ-выводов обусловлено режимом отладки измельчителя, где для гибкой регулировки частоты вращения приводов использованы потенциометры 4, 6, подключенные с аналоговыми входами A0 и A1. Потенциометры 4, 6 имеют переключатели для принудительного отключения режима отладки. Кроме этого, к выводам подсоединены аноды светодиодов в качестве сигнальных ламп приводов 3, 5 при отладочном режиме с возможностью менять яркость при корректировке частоты вращения мотора-редуктора и мотора постоянного тока потенциометрами.

В качестве сигнальных ламп приводов рабочего режима представлены светодиоды 1, подключенные к цифровым выводам, связанные с программной кнопкой пошагового включения/выключения приводов, подсоединенной к цифровому выводу, выполняющего роль входа. Список компонентов схемы, их наименование и количество представлено в табл. 1.

На рисунке 3 представлены результаты графического программирования предлагаемой системы управления, выполненной на языке FBD. Согласно этой схеме (рис. 3, а) предусмотрен цифровой вход, выполняющий роль программной кнопки пошагового включения/выключения приводов (см. рис. 3, «кнопка вкл./выкл.»), соединенный через функциональные блоки «таймер» с выходами привода дозатора и основного привода (ротора). Для реализации рабочего режима – пошагового включения/отключения – использовано два блока «таймер» с задержкой на включение и отключение. Кроме этого к каждому из приводов подсоединена лампа сигнальная через функциональный блок «генератор – симметричный мультивибратор» для индикации рабочего режима путем мигания.

Для реализации режима отладки использованы аналоговые входы A0 и A1 для потенциометров основного привода (ротора) и привода дозатора, которые через функциональные блоки «масштабирование» связаны с выходами привода дозатора ШИМ и привода основного ШИМ. Наименование входов и выходов схемы, а также номера контактов представлены на рис. 3, б.

Разработанный графический код FBD преобразовывался до языка программирования C++, компилировался в Arduino IDE и загружался в блок «Код» симуляционной среды Autodesk Circuits on Tinkercad с предварительно собранной схемой автоматизации. Далее соответствующей командой в программе проводилось моделирование функционирования разработанной системы управления автоматизированного электропривода измельчителя плодовоовощной продукции, доказавшее работоспособность и эффективность схемы.

Список компонентов электрической схемы

Компонент	Имя	Количество
Ардуино Уно R3	U1	1
Мотор-редуктор	M1	1
Электрический привод с Н-мостом	U2	1
Двигатель постоянного тока	M2	1
Резистор 100 Ом	P2 P1 P3	3
Ползунковый переключатель	C5 C1 C2	3
Зеленый светодиод	Д1	1
Синий светодиод	Д2	1
Потенциометр 25 кОм	Rpot1	1
Резистор 100 кОм	R6	1
Потенциометр 250 кОм	Rpot2	1
Красный светодиод	Д3	1
Желтый светодиод	Д4	1
Источник питания	P1	1

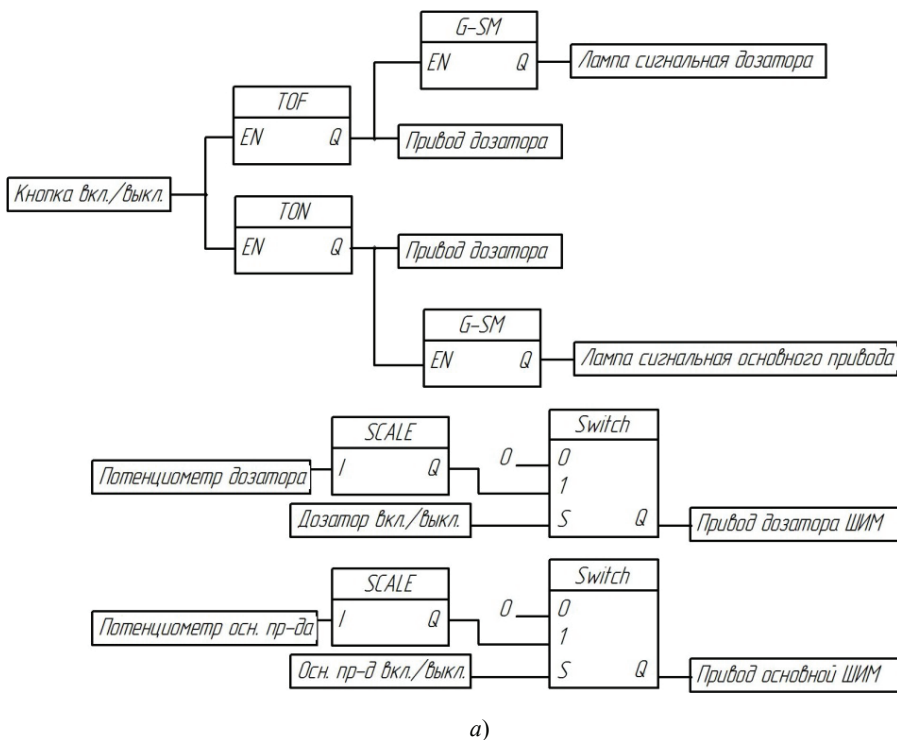
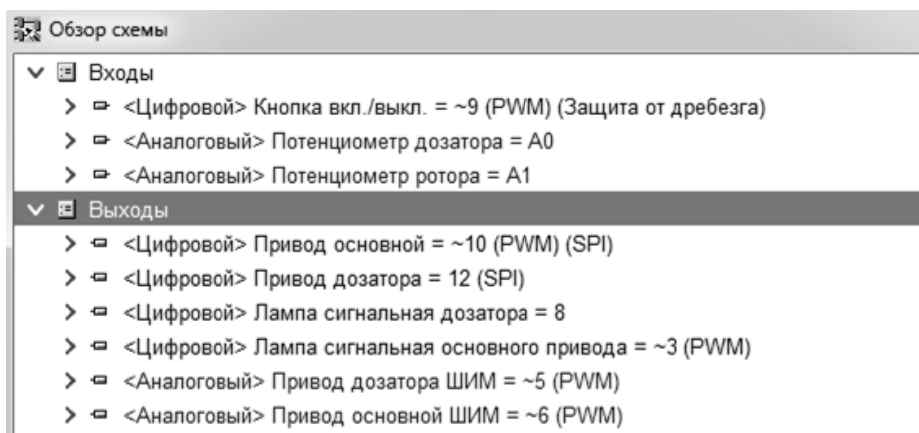


Рис. 3. Результаты графического программирования на языке FBD (начало):  
а – графическая схема



б)

**Рис. 3. Окончание:**

б – обзор тэгов графической схемы

### Заключение

Предлагаемое устройство позволяет осуществить процесс измельчения плодов и овощей без обильного соковыделения и защемления измельчаемых материалов между ножами при минимальных разрушениях их структуры с пониженными энергозатратами. Данные факторы обеспечиваются расположением ножей зигзагообразно, что существенно снижает трение продукта и эффект стесненного резания, а, следовательно, позволяет снизить энергозатраты и толщину ножей [10].

Применение сменных ножевых стенок, установленных на концах направляющих труб центробежного ротора, позволяет существенно снизить металлоемкость устройства, упростить конструкцию, а также повысить эффективность технологического процесса за счет исключения постоянной корректировки угла атаки ножей. Кроме этого, при использовании сменных ножевых стенок существенно повышается номенклатура получаемого готового продукта: ломтики, брусочки и др.

Предлагаемая система управления автоматизированного электропривода измельчителя плодоовощной продукции обеспечивает в рабочем режиме поочередный запуск и отключение основного привода и привода дозатора с индикацией режима путем мигающей световой сигнализации и возможностью корректировок задержки времени на включение и отключение. Также в режиме отладки предусмотрено гибкое настраивание частоты вращения приводов с отображением изменения яркости светодиодов, соответствующих приводам измельчителя.

Поочередный запуск/отключение приводов в рабочем режиме позволяет избежать перегрузок ротора плодоовощным материалом до выхода его привода на частоту вращения рабочего режима, а также предотвратить накопление неизмельченного материала в роторе и ножевых аппаратах после отключения рабочего режима. Устройство может быть реализовано в пищевой промышленности и сельскохозяйственном производстве.

### Список литературы

1. Analysis of Root Crops Preparation System / A. A. H. Al-Maidi, A. V. Brusenkov, V. P. Kapustin, Yu. V. Rodionov // International Journal of Agricultural and Statistical Sciences. – 2021. – No. 16. – P. 1345 – 1350.

2. Антонов, Н. М. Результаты экспериментальных исследований по определению усилий резания плодов и корнеплодов / Н. М. Антонов, Ю. В. Искуснов, Н. И. Лебедь // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 2 (26). – С. 137 – 141.

3. Полезная модель 174962 Российская Федерация, МПК В02С 18/06. Измельчитель плодоовощной продукции / Н. М. Антонов, Н. И. Лебедь, А. В. Малолетов, А. К. Мамахай ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский аграрный университет». – № 2017116509 ; заявл. 11.05.2017 ; опубл. 13.11.2017, Бюл. № 32. – 7 с.

4. Antonov, N. M. Energetic Calculation of an Apple Chopper with Zigzagging Knife Location in the Cutting Unit / N. M. Antonov, N. I. Lebed, A. M. Makarov // Journal of Food Process Engineering. – 2017. – Vol. 40, Issue 2. – P. e12352. doi: 10.1111/jfpe.12352

5. Lebed, N. I. Investigation of Process of Cutting Fruit and Vegetable Raw Materials Into Slices Using Rotary Chopper / N. I. Lebed, N. M. Antonova, G. G. Rusakova // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2019, 25 – 29 March 2019, Sochi. – Springer, Cham., 2020. – P. 451 – 459. doi: 10.1007/978-3-030-22041-9\_49

6. Соммер, У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino : пер. с нем. языка / У. Соммер. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 256 с.

7. Борисов, И. И. Имитационное моделирование мехатронных систем : учеб. пособие / И. И. Борисов, С. А. Колюбин. – СПб. : Санкт-Петербургский нац. исслед. ун-т информационных технологий, механики и оптики, 2020. – 103 с.

8. Система управления брагоректификационной установкой / В. А. Кербель, М. А. Ложкин, И. А. Елизаров [и др.] // Управление большими системами : материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых, 10 – 13 сентября 2019 г., Тамбов. – Тамбов, 2019. – С. 135 – 141.

9. Елизаров, И. А. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры : учеб. пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2021. – 236 с.

10. Антонов, Н. М. Оптимизация конструктивных параметров измельчителя плодов и корнеплодов / Н. М. Антонов, Н. И. Лебедь, А. К. Мамахай // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2016. – № 3 (43). – С. 231 – 238.

---

## Modeling the Control System of an Automated Electric Drive for a Fruit and Vegetable Chopper in a Virtual Simulation Environment

N. I. Lebed

*Department of Power Supply and Energy Systems, nik8872@yandex.ru;  
Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia*

**Keywords:** automation; automated electric drive; grinder; microcontrollers; knife machine; fruit and vegetable products; cutting.

**Abstract:** A grinder for fruit and vegetable products has been developed, the advantages of which include high productivity with minimal energy consumption. A system of microprocessor control of the grinder based on the hardware platform of the programmable microcontroller ATmega 328 is proposed.

The control system of an automated grinder electric drive was modeled in a cloud environment using FBD and C++ programming languages. A list of components of the electrical circuit of the control system was selected, a graphical diagram of the program code was built, and a list of tags (inputs, outputs, variables) was also shown. The system was tested for operability in the virtual simulation cloud-debugging environment Autodesk Circuitson on Tinkercad, which proved its operability and efficiency.

### References

1. Al-Maidi A.A.H., Brusenkov A.V., Kapustin V.P., Rodionov Yu.V. Analysis of Root Crops Preparation System, *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, 2021, no. 16, pp. 1345-1350.
2. Antonov N.M., Iskusnov Yu.V., Lebed' N.I. [Results of experimental studies to determine the cutting forces of fruits and root crops], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshye professional'noye obrazovaniye* [News of the Nizhnevolzhsky agro-university complex: Science and higher professional education], 2012, no. 2 (26), pp. 137-141. (In Russ.)
3. Antonov N.M., Lebed' N.I., Maloletov A.V., Mamakhay A.K. *Izmel'chitel' plodoovoshchnoy produktsii* [Fruit and vegetable grinder], Russian Federation, 2017, Utility model 174962. (In Russ.)
4. Antonov N.M., Lebed N.I., Makarov A.M. Energetic Calculation of an Apple Chopper with Zigzagging Knife Location in the Cutting Unit, *Journal of Food Process Engineering*, 2017, vol. 40, issue 2, p. e12352, doi: 10.1111/jfpe.12352
5. Lebed N.I., Antonova N.M., Rusakova G.G. Investigation of Process of Cutting Fruit and Vegetable Raw Materials Into Slices Using Rotary Chopper, *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2019*, 25 - 29 March, 2019, Sochi, Springer, Cham., 2020, pp. 451-459, doi: 10.1007/978-3-030-22041-9\_49
6. Sommer, U. *Programmirovaniye mikrokontrollernykh plat Arduino/Freeduino* [Programming microcontroller boards Arduino/Freeduino], St. Petersburg: BKHV-Peterburg, 2012, 256 p. (In Russ.)
7. Borisov I.I., Kolyubin S.A. *Imitatsionnoye modelirovaniye mekhatronnykh sistem: uchebnoye posobiye* [Simulation modeling of mechatronic systems: textbook], St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, 2020, 103 p. (In Russ.)
8. Kerbel' V.A., Lozhkin M.A., Yelizarov I.A., Nazarov V.N., Tret'yakov A.A. *Upravleniye bol'shimi sistemami* [Management of large systems], *Proceedings of the XVI All-Russian school-conference of young scientists*, 10 - 13 September, 2019, Tambov, 2019, pp. 135-141. (In Russ.)
9. Yelizarov I.A., Martem'yanov Yu.F., Skhirtladze A.G. *Tekhnicheskiye sredstva avtomatizatsii. Programmno-tekhnicheskiye komplekсы i kontrolyery: uchebnoye posobiye* [Technical means of automation. Software and hardware complexes and controllers: a tutorial], Stary Oskol: OOO "Tonkiye naukoymkiye tekhnologii", 2021, 236 p. (In Russ.)
10. Antonov N.M., Lebed' N.I., Mamakhay A.K. [Optimization of the design parameters of the grinder of fruits and root crops], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshye professional'noye obrazovaniye* [News of the Nizhnevolzhsky agro-university complex: Science and higher professional education], 2016, no. 3 (43), pp. 231-238. (In Russ.)



## **Simulation des automatisierten Steuerungssystems des Elektroantriebs für Obst- und Gemüsehacker in einer virtuellen Simulationsumgebung**

**Zusammenfassung:** Es ist ein Zerkleinerer für Obst- und Gemüseprodukte entwickelt, zu dessen Vorteilen eine hohe Produktivität bei minimalem Energieverbrauch gehört. Es ist ein System zur Mikroprozessorsteuerung des Häckslers vorgeschlagen, das auf der Hardwareplattform des programmierbaren Mikrocontrollers ATmega 328 basiert.

Die Steuerung des automatisierten Elektroantriebs des Häckslers ist in einer Cloud-Umgebung mit FBD-Programmiersprachen und C++ modelliert. Eine Liste der Komponenten des elektrischen Schaltkreises des Steuersystems ist ausgewählt, ein grafisches Diagramm des Programmcodes ist erstellt und eine Liste von Tags (Eingänge, Ausgänge, Variablen) ist ebenfalls angezeigt. Das System ist in der virtuellen Simulations-Cloud-Debugging-Umgebung Autodesk Circuitson auf Tinkercad auf Funktionsfähigkeit getestet, was seine Funktionsfähigkeit und Effizienz bewiesen hat.

---

## **Simulation du système de contrôle du broyeur électrique automatisé de fruits dans un environnement de simulation virtuel**

**Résumé:** Est élaboré un broyeur de fruits dont les avantages incluent une productivité élevée avec des coûts énergétiques minimes. Est proposé le système de contrôle par microprocesseur du broyeur à la base de la plate-forme matérielle du micro-contrôleur programmable Atmega 328.

Dans un environnement cloud, est modélisé le système de contrôle du mécanisme de commande électrique automatisé utilisant les langages de programmation FBD et C++. Est choisi une liste des composants du circuit électrique du système de contrôle, est montré un schéma graphique du code du programme (entrées, sorties, variables). Est effectué le contrôle du système dans l'environnement de simulation de cloud virtuel d'Autodesk Circuitson on Tinkercad qui a prouvé son capacité et son efficacité.

---

**Автор:** *Лебедь Никита Игоревич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и энергетические системы», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», Волгоград, Россия.