

## Аналитико-имитационная модель функционирования системы автономного энергообеспечения от двигателя внешнего сгорания на древесном топливе измельчающе-транспортной машины для производства щепы

*П.Н. Анисимов, Е.М. Онучин, А.А. Медяков*

*Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола*

**Аннотация:** Предложена методика создания аналитико-имитационной функциональной модели системы, состоящей из мобильной рубительной машины для лесосечных работ и передвижного энергетического модуля, на основе метода декомпозиции. Приведено оригинальное техническое решение системы автономного энергообеспечения лесосечной машины для производства щепы от двигателя внешнего сгорания на древесном топливе. Функционирование отдельных компонентов моделируемой системы имитируется при помощи среды динамического моделирования Simulink языка MATLAB. С целью удобства проведения экспериментов предлагается использование виртуальных приборов LabVIEW для задания входных и управляющих параметров, а также отображения выходных параметров. Описаны входные, управляющие, возмущающие и выходные параметры каждого функционального блока системы. Предполагается использование разрабатываемой аналитико-имитационной модели для обоснования основных параметров автономной системы производства щепы, а также дальнейшей разработки системы автоматизированного управления.

**Ключевые слова:** топливная щепка, древесное топливо, низкокачественная древесина, имитационная модель, LabVIEW, Simulink, мобильная рубительная машина, автономное энергообеспечение, лесозаготовка.

**Введение.** На современном этапе развития энергетики наиболее значимая роль в повышении эффективности энергоснабжения, а также снижении отрицательного воздействия на окружающую среду отводится цифровизации электрических сетей, еще большее развитие централизованного электроснабжения с объединением множества распределенных источников в единую сеть [1]. Увеличение количества транспортных машин сопровождалось усовершенствованием двигателей внутреннего сгорания, снижением выбросов загрязняющих атмосферу веществ. Однако, вследствие концентрации большого числа транспорта с бензиновыми и дизельными двигателями в агломерациях их воздействие на окружающую среду остается критическим. Поэтому в последнее время

---

наметился вектор перехода к электротранспорту, как пассажирскому, так и грузовому [2]. По всему миру начинается строительство электрозаправочных станций и интеграция электрических транспортных средств в общую систему электроснабжения. Также перспективным, но менее безопасным для транспорта считается водородное топливо [3].

Увеличивающееся внедрение электрических двигателей для привода наземного транспорта и технологических машин приведет к снижению объемов производства и потребления бензина и дизельного топлива, что повлечет за собой рост его стоимости и снижение логистической доступности. В связи с этим, обеспечение энергией лесозаготовок, ведущихся в удаленных от инженерных сетей уголках нашей страны является важной практической задачей. Автономное энергообеспечение технологических процессов рубки деревьев и первичной обработки возможно с использованием древесной щепы. Дальнейшая переработка качественной древесины на пиломатериалы теоретически также может быть обеспечена энергией от автономного источника. Топливом для данного источника может служить низкокачественная древесина, переработанная в щепу. Процесс производства щепы на лесосеке из низкокачественной древесины при автономном энергообеспечении с помощью разрабатываемой системы машин является объектом данного исследования.

Технологическая машина для производства древесной щепы на лесосеке и установка для автономного обеспечения энергией данной машины представляют собой сложную техническую систему. Необходимость имитационного моделирования объясняется новизной компоновки предлагаемого оборудования. Математическая модель, описанная в данной работе, является переработанной и дополненной моделью измельчающе-транспортной машины [4] с учетом особенностей нового устройства [5].

---

**Методика исследования.** Представленная математическая модель гомоморфная, вследствие сложности моделируемой системы отражает только существенные её свойства. Математическая модель является имитационной функциональной теоретической [6]. Далее представлены основные характеристики разрабатываемой модели:

- 1) С сосредоточенными параметрами, поскольку целью моделирования на первом этапе является определение технических и технологических параметров множества объектов, составляющих систему, взаимодействующих друг с другом и окружающей средой;
- 2) Теоретическая с использованием эмпирических зависимостей;
- 3) Вероятностная, поскольку имеются неконтролируемые, но существенные факторы, которые можно моделировать статистически.
- 4) Упрощенная идеализированная, поскольку считаем, что имеются существенные и несущественные факторы, при этом несущественные были отброшены.

Математическая модель реализуется с использованием инструментов LabVIEW, MATLAB, Simulink и Excel, которые дают возможность проведения качественных численных экспериментов [7, 8]. Структура имитационной модели в LabVIEW представлена на рис. 1. Для упрощения исследования выполнена декомпозиция системы. Выделены две подсистемы, а также составляющие их компоненты. Всего модель включает 11 программ (виртуальных приборов). Главная программа - автономная лесозаготовительная система, включает в себя две подпрограммы: программу, моделирующую энергомодуль, и программу моделирующую работу технологической машины. В свою очередь, энергомодуль моделируется с помощью четырех подпрограмм: двигатель, электрогенератор, газогенератор, источник бесперебойного питания (ИБП); а

---

технологическая машина включает подпрограммы: электродвигатель, движитель, гидроманипулятор и рубильная установка.

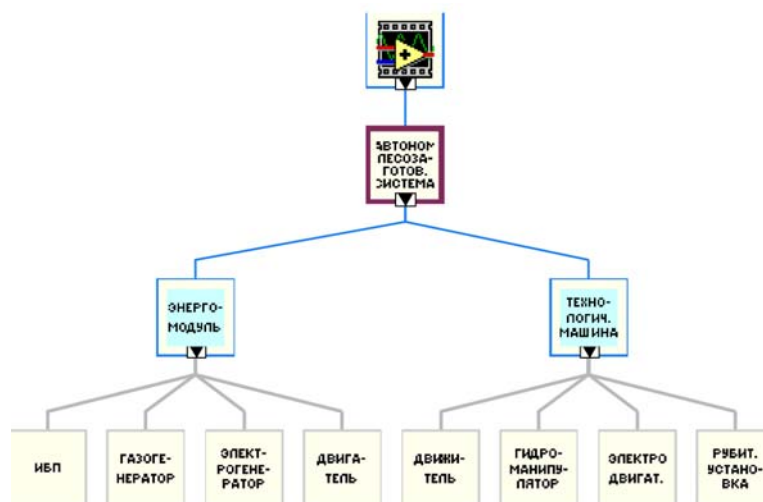


Рис. 1. – Иерархия виртуального прибора LabVIEW, моделирующего систему

Подпрограммы моделируют основное генерирующее оборудование энерго модуля, включающего позиции 8-11 и 15-20 рисунка 2 и оборудование технологической машины, включающей позиции 1-7, 12-14, 21 и 22. При этом имитация работы стандартного оборудования, например, электрогенератора, электродвигателя [9], преобразовательных устройств [10], гидростанции, осуществляется в среде Simulink. Выходные параметры данного оборудования, полученные в Simulink, передаются на виртуальные приборы LabVIEW.

Аналитическая часть модели представлена дифференциальными уравнениями, математически описывающими процессы, которые решаются аналитическими и численными методами. Имитация работы установки во времени достигается использованием циклов по условию, которые позволяют производить нужное число итераций, то есть повторять численное решение систем уравнений при изменяющихся начальных условиях до достижения определенных исследователем значений. Также для имитации процессов используются логические функции и генераторы случайных чисел. Логические функции необходимы для определения взаимозависимости

начальных условий различных подпрограмм, для того чтобы при каждом новом исследовании с помощью модели можно было вручную задавать как можно меньше граничных условий. Генераторы случайных чисел имитируют значения неконтролируемым факторов.

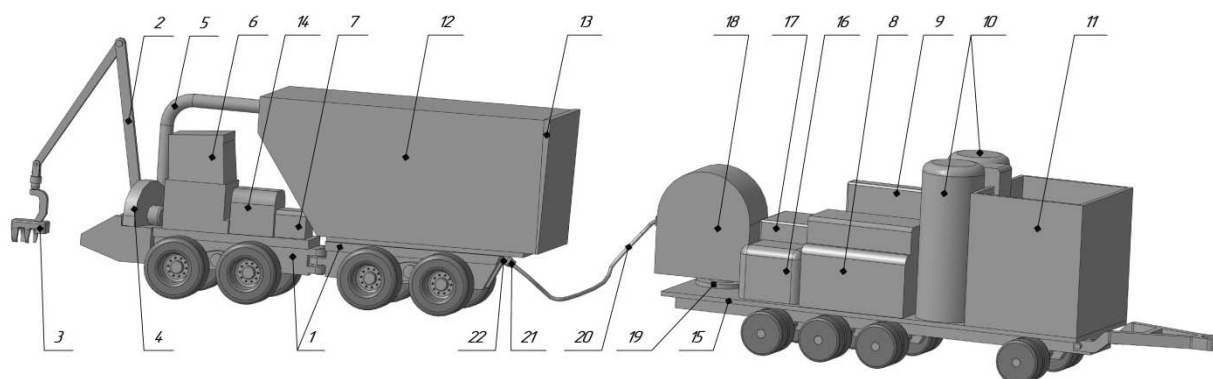


Рис. 2. – Система автономного энергообеспечения от двигателя внешнего сгорания на древесном топливе машины для производства щепы:

- 1 – самоходное шасси, 2 – гидроманипулятор, 3 – рабочий орган гидроманипулятора, 4 – рубильная машина, 5 – пневмотранспортер щепы, 6 – кабина оператора, 7 – гидростанция, 8 – двигатель внешнего сгорания, 9 – охладитель двигателя, 10 – газогенераторная установка, 11 – контейнер со щепой, 12 – кузов для щепы, 13 – откидывающийся борт; 14 – силовая установка, 15 – шасси энергетической установки, 16 – источник бесперебойного питания с аккумулятором, 17 – электрогенератор, 18 – барабан, 19 – поворотная платформа, 20 – силовой кабель, 21 – электрический соединитель кабеля, 22 – электрический соединитель машины

Существенные факторы модели для каждой подпрограммы энергомодуля и технологической машины представлены в таблице №1. Входными параметрами являются факторы, которыми нельзя управлять непосредственно при моделировании реальных процессов, они определены внешним воздействием на систему, либо определены другими параметрами и процессами системы – это параметры окружающей среды и выходные параметры других субмоделей. Управляющие параметры могут изменяться исследователем модели вручную, либо автоматически по определенным алгоритмам. Изменение управляющих параметров изменяет режим работы моделируемого оборудования. Возмущающие параметры могут оказывать такое же воздействие на систему, как и входные и управляющие параметры,

но величина их случайна (в рамках заданного исследователем диапазона) или определена статистически. Выходные параметры в данном случае представляют информацию о поведении системы и отдельных ее компонентов.

Несущественные факторы, которые отбрасываются: влияние колебательных движений рабочего органа манипулятора при движении машины на ее динамику, влияние изменяющейся массы щепы в кузове на положение центра тяжести машины, изменение силы трения кабеля о ролик во время размотки с барабана при различных углах изгиба кабеля.

Таблица № 1

Параметры аналитико-имитационной модели

Входные параметры	Управляющие параметры	Возмущающие параметры	Выходные параметры
<b>Газогенератор</b>			
требуемый расход генераторного газа, температура окружающего воздуха, влагосодержание щепы, влагосодержание воздуха	подача воздуха в газогенератор, объем направляемых в контейнер со щепой уходящих газов двигателя	наличие осадков, плотность древесины	требуемый расход щепы, потребление тока электродвигателем вентилятора, расход генераторного газа, состав и температура генераторного газа
<b>Двигатель внешнего сгорания</b>			
состав генераторного газа, требуемая полезная мощность на валу двигателя	давление рабочего тела двигателя	отклонения состава генераторного газа от расчетного	требуемый расход генераторного газа, полезный крутящий момент на валу, частота вращения вала, потребление тока электродвигателем насоса, температура, объем и энтальпия уходящих газов

продолжение таблицы № 1

Входные параметры	Управляющие параметры	Возмущающие параметры	Выходные параметры
<b>Электрогенератор</b>			
частота вращения вала, крутящий момент на валу, требуемая ЭДС на клеммах статорной обмотки, требуемая электрическая мощность	ток возбуждения	отклонения частоты вращения вала от расчетной	ЭДС на клеммах статорной обмотки, электрическая мощность от генератора
<b>ИБП</b>			
требуемая электрическая мощность, мощность от генератора, ЭДС на клеммах статорной обмотки	изменение емкости аккумулятора электрической энергии	пусковые и токи перегрузки	напряжение источника, электрическая мощность источника
<b>Двигатель</b>			
влажность грунта, уклон волока, температура окружающего воздуха, высота снежного покрова	скорость движения, передаточное число	локальное повышение влажности грунта, локальные препятствия (ямы, пни, кочки, камни.)	необходимый крутящий момент, необходимая скорость вращения вала
<b>Рубительная установка</b>			
температура и площадь поперечного сечения измельчаемой древесины, порода дерева, запас на лесосеке	скорость подачи измельчаемого материала в рубительную машину	локальное изменение твердости древесины (на месте сучьев, гнили, мерзлоты и т.д.)	необходимый крутящий момент на валу, скорость вращения вала, производительность по щепе
<b>Гидроманипулятор</b>			
вес подаваемой древесины, запас древесины на лесосеке	вылет гидроманипулятора	увеличение момента при случайном зацеплении дерева во время его подачи	потребляемый электроприводом насоса гидростанции ток
<b>Электродвигатель</b>			
необходимый крутящий момент на валу, необходимая частота вращения ротора электродвигателя	величина питающего напряжения	кратковременные перегрузки на валу	потребляемый ток, крутящий момент на валу электродвигателя, частота вращения ротора



**Выводы.** Разрабатываемая аналитико-имитационная модель функционирования системы машин, состоящей из измельчающе-транспортной машины для производства щепы на лесосеке и передвижной установки для ее автономного энергообеспечения с использованием двигателя внешнего сгорания на древесном топливе отражает наиболее существенные параметры. Сопряжение LabVIEW с MATLAB Simulink представляется обоснованным решением при моделировании сложной многокомпонентной технической системы, когда динамическое моделирование отдельных узлов, агрегатов и машин реализуется в среде Simulink, а управление процессом численного эксперимента исследователь осуществляется с помощью виртуальных приборов LabVIEW.

Предполагается использование данной модели для дальнейшей разработки системы машин, для проведения имитационных экспериментов с целью определения основных технологических и режимных параметров предлагаемого устройства, определения энергетической эффективности производства щепы.

### Литература

1. Mathiesena B.V., Lundb H., Connollya D., Wenzelc H., Østergaardb P.A., Möllerd B., Nielsenb S., Ridjana I., Karnøea P., Sperlingb K., Hvelplundb F.K. Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions // Applied Energy. 2015. №145. pp. 139-154.
2. Kumar P., Srivastava K.N., Dhar A. Role of Electric Vehicles in Future Road Transport // Gautam A., De S., Dhar A., Gupta J., Pandey A. (eds) Sustainable Energy and Transportation. Energy, Environment, and Sustainability. Singapore: Singapore, 2018. pp. 43-60.
3. Emontsa B., Schiebahna S., Görnerb K., Lindenbergerc D., Markewitzd P., Mertene F., Stoltenaf D. Re-energizing energy supply: Electrolytically-produced



hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // Journal of Power Sources. 2017. №342. pp. 320-326.

4. Онучин Е.М., Анисимов П.Н. Математическая модель функционирования измельчающе-транспортной машины для производства топливной щепы на лесосеке с энергообеспечением от газогенераторного двигателя Стирлинга // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. №221. С. 258-270.

5. Anisimov P.N., Medyakov A.A. Development of an autonomous energy supply system for harvesting wood resources based on wood fuel // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. №315. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/315/5/052058/pdf](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/315/5/052058/pdf).

6. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Минск: Новое знание, 2013. 584 с.

7. Максимов В.П. Методология численного эксперимента динамической модели подпокрывного агрегата // Инженерный вестник Дона. 2012. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/780](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/780).

8. Семёнов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // Современные наукоемкие технологии. 2017. №8. С. 56-64.

9. Данилова М.Г., Серов М.Ю., Богадевич Д.И., Черемных И.С., Князев И.С. Моделирование системы прямого управления моментом асинхронного двигателя с регулятором на основе нечеткой логики в Simulink // Инженерный вестник Дона. 2017. №2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_183\\_Danilova\\_Serov.pdf\\_360aa21fa8.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_183_Danilova_Serov.pdf_360aa21fa8.pdf)

10. Кралин А.А., Алтунин Б.Ю. Моделирование трансформаторов преобразовательных агрегатов в Simulink // Инженерный вестник Дона. 2014. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362).

---

## References

1. Mathiesena B.V., Lundb H., Connollya D., Wenzelc H., Østergaardb P.A., Möllerd B., Nielsenb S., Ridjana I., Karnøea P., Sperlingb K., Hvelplundb F.K. Applied Energy. 2015. №145. pp. 139-154.
2. Kumar P., Srivastava K.N., Dhar A. Role of Electric Vehicles in Future Road Transport. Gautam A., De S., Dhar A., Gupta J., Pandey A. (eds) Sustainable Energy and Transportation. Energy, Environment, and Sustainability. Singapore: Singapore, 2018. pp. 43-60.
3. Emontsa B., Schiebahna S., Görnerb K., Lindenbergerc D., Markewitzd P., Mertene F., Stoltenaf D. Journal of Power Sources. 2017. №342. pp. 320-326.
4. Onuchin E.M., Anisimov P.N. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2017. №221. pp. 258-270.
5. Anisimov P.N., Medyakov A.A. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. №315. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/315/5/052058/pdf](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/315/5/052058/pdf).
6. Tarasik V.P. Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh system [Mathematical modeling of technical systems]. Minsk: Novoe znanie, 2013. 584 p.
7. Maksimov V.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/780](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/780).
8. Semenov A.S., Yakushev I.A., Egorov A.N. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2017. №8. pp. 56-64.
9. Danilova M.G., Serov M.Yu., Bogadevich D.I., Cheremnykh I.S., Knyazev I.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_183\\_Danilova\\_Serov.pdf\\_360aa21fa8.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_183_Danilova_Serov.pdf_360aa21fa8.pdf)
10. Kralin A.A., Altunin B.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362).