



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-23-29
УДК 631.171

Научная статья / Research article

Создание и применение мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов

Ю.Ф. Лачуга^а, З.А. Годжаев^б, И.Я. Редько^с

^аОтделение сельскохозяйственных наук РАН, Москва, Российская Федерация

^бФедеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

^сЮжно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация

✉ redko_iya@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 28 ноября 2021 г.

Доработана: 15 января 2022 г.

Принята к публикации: 25 января 2022 г.

Ключевые слова:

многофункциональные энерготехнологические комплексы, энергоэффективность, концепции развития, инновационные технологии, агропромышленный комплекс, многофункциональность, тягово-энергетическая концепция

Аннотация. В настоящее время в мире идут процессы трансформации энергетических систем, в результате которых создается их новая архитектура. Основными факторами, обуславливающими трансформацию энергетических систем, являются значительное уменьшение стоимости генерации энергии и увеличение потребления электроэнергии, включая распределенную генерацию, электротранспорт, электрификацию мобильных энергосредств в агропромышленном комплексе, систему управления накоплением энергией, энергообеспечения и интеллектуализации производства. Факторами развития энерготехнологических комплексов выступают также возможности создания экологически чистых ферм на возобновляемых источниках энергии в районах с труднодоступной логистикой энергетических ресурсов, таких как бензин и дизельное топливо. Уменьшение выбросов CO₂ в атмосферу и улучшение экологии отнюдь не единственный фундаментальный результат развития энерготехнологических комплексов. Проанализированы основные принципы создания мобильных энергетических комплексов. Многокритериальная постановка задачи для оценки эффективности позволяет выявить наиболее подходящие критерии качества и функциональные ограничения.

Для цитирования

Лачуга Ю.Ф., Годжаев З.А., Редько И.Я. Создание и применение мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 23–29. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-23-29>



Creation and application of mobile multifunctional energy technology complexes

Yury F. Lachuga^a, Zakhid A. Godzhaev^b , Ivan Ya. Redko^c  

^aDepartment of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^bFederal Scientific Agroengineering Center, All-Union Research Institute of Agricultural Mechanization, Moscow, Russian Federation

^cSouth Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

 redko_iya@mail.ru

Article history

Received: November 28, 2021

Revised: January 15, 2022

Accepted: January 25, 2022

Keywords:

multifunctional energy technology complexes, energy efficiency, development concepts, innovative technologies, agriculture, multifunctionality, traction and energy concept

Abstract. Currently, there are processes of transformation of energy systems in the world, as a result of which a new architecture is being created. The main factors driving the transformation of energy systems are a significant reduction in the cost of energy generation and an increase in electricity consumption, including distributed generation, electric transport, electrification of mobile energy facilities in the agro-industrial complex, energy storage management system, energy supply and intellectualization of production. Factors in the development of energy technology complexes are also the possibility of creating environmentally friendly farms using renewable energy sources in areas with difficult-to-access logistics of energy resources, such as gasoline and diesel fuel. Reducing emissions of CO₂ into the atmosphere and improving the environment is by no means the only fundamental result of the development of energy technology complexes. This paper reviews the basic principles of creating mobile energy complexes, based on the analysis. Multi-criteria formulation of the task for evaluating the effectiveness, allows you to identify the most appropriate quality criteria and functional limitations.

For citation

Lachuga YuF, Godzhaev ZA, Redko IYa. Creation and application of mobile multifunctional energy technology complexes. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):23–29. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-23-29>

Введение

В настоящее время наиболее активно развиваются инновационные технологии в области электроэнергетики и электрификации мобильных процессов в отраслях, в том числе в агропромышленном комплексе (АПК) [1–3]:

– на базе солнечных аэрокосмических энергетических комплексов со сверхвысокой частотой (СВЧ) и лазерными магистралями передачи энергии, которые могут обеспечить энергетическую безопасность и надежное энергоснабжение на отдаленных и труднодоступных территориях Сибири, Севера и Дальнего Востока, не охваченных централизованным энергоснабжением;

– на базе многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК) гибридной генерации, которые являются основой автономных систем энергоснабжения и используют все многообразие местных энергетических ресурсов;

– на базе мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов, на основе ин-

новационных тягово-энергетической и энергетической концепций развития мобильной техники, которые позволят принципиально новым способом получить энергию и продукты питания, в том числе с использованием фитотронных технологий.

МЭК гибридной генерации и мобильные комплексы являются наиболее мощными потребителями энергоресурсов в отраслях ТЭК и АПК соответственно. Однако их энергетическая и экологическая эффективность использования энергоресурсов недостаточно изучена. Поскольку МЭК гибридной генерации, мобильные и аэрокосмические направлены на производство электроэнергии, тепла и сельскохозяйственной продукции, их энергетические и технологические схемы могут быть описаны на основе таких аналитических зависимостей, которые позволят разработать математическую модель обобщенного МЭК. Эта модель в зависимости от внешних условий будет определять тип МЭК: мобильный, гибридной генерации или аэрокосмический. В данном исследова-

нии рассмотрим тягово-энергетическую концепцию создания мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов и разработку общих технических требований к мобильным МЭК.

1. Анализ и выявление первичных требований к мобильным комплексам

Анализ существующих конструктивно-компоновочных схем мобильных технологических агрегатов (МТА) показал, что они практически исчерпали возможности дальнейшего существенного повышения технико-экономических показателей. Поэтому повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов МТА путем улучшения использования структуры и совершенствования производственного оборудования становится все более затруднительным. Действительно, основой структуры производственного оборудования МТА в настоящее время является двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Следовательно, показатели работы МТА в значительной мере будут зависеть, прежде всего, от эффективности этого звена (модуля). Если проанализировать основные направления совершенствования ДВС: повышение надежности, улучшение экологических показателей и топливной экономичности, снижение эксплуатационных расходов, увеличение удельной мощности, расширение многотопливных свойств и применения электроники, то можно заключить, что возможности его совершенствования уже исчерпаны. Поэтому решение проблем в отраслях АПК надо переносить с традиционной компоновки мобильного агрегата с тяговым принципом передачи энергии к рабочим машинам (технологическим модулям) на тягово-энергетическую концепцию создания таких агрегатов (комплексов). В самом общем виде этой концепции соответствует мобильный многофункциональный энерготехнологический комплекс, использующий все многообразие местных энергетических ресурсов, направленных на удовлетворение нужд населения и производства в электрической энергии, тепле и различных видах моторных топлив. К наиболее высокому уровню развития таких систем можно отнести многофункциональный энерготехнологический комплекс модульного типа. Под многофункциональностью следует понимать возможность такого мобильного МЭК работать на местных топливно-энергетических ресурсах, в том числе на генераторном газе и биотопливах, и выраба-

тывать различные виды энергии. Ветер, гидроэнергетика и солнечная энергия являются источниками «чистой» электроэнергии, которая впоследствии может храниться в различных формах для кратковременного и длительного использования. Биомасса, солнечная энергия и ветер – широкодоступные альтернативные возобновляемые источники энергии (ВИЭ), которые получают с использованием современных источников энергии. Биодизель, биоэтанол, биометан – энергетические ресурсы, произведенные из экологически чистого и многообещающего источника энергии – биомассы.

МЭК представляет собой систему, состоящую из отдельных модулей, конструктивно и функционально совместимых между собой. Комбинации различных функционально и конструктивно согласуемых модулей позволяют получать различные по составу и мощности мобильные комплексы в зависимости от размеров поля и требуемой производительности. Такая концепция развития мобильных средств позволяет гибко изменять конструктивно-компоновочные решения МЭК в зависимости от внешних условий его эксплуатации.

Этот комплекс (система) может состоять из следующих звеньев: «местные энергетические ресурсы – модуль для производства моторного топлива – многотопливный ДВС – элементы системы генерации электроэнергии и тепла – тип трансмиссии – преобразователь частоты – накопитель энергии – многоканальная передача электрической и тепловой энергии – потребитель энергии различной физической природы».

Анализ общих конструктивно-компоновочных решений и классификация мобильных МЭК указывают на их огромное разнообразие. Однако преимущественное распространение получили мобильные комплексы на базе ДВС, работающих на дизельном топливе.

2. Основные направления развития МЭК

Для достижения высокого качества и надежности функционирования мобильных МЭК необходимо решить проблемы, связанные, прежде всего, с производительностью, многофункциональностью, энергонасыщенностью, металлоемкостью, многотопливностью, экологической безопасностью, снижением эксплуатационных расходов, оптимизацией выбора состава оборудования на стадии проектирования мобильной техники, совершенствованием

режимов работы и конструктивно-компоновочных решений мобильной техники по критериям энергетической, функциональной и экономической эффективности.

Поэтому важнейшими направлениями развития мобильных средств являются:

1) совершенствование технологии производства различных видов моторных топлив, электрической и тепловой энергии;

2) расширение многотопливных свойств ДВС в составе МЭК;

3) улучшение использования структуры мобильного парка в отраслях АПК;

4) совершенствование отдельных модулей (звеньев) МЭК;

5) оптимизация параметров и режимов работы мобильных комплексов;

6) оптимизация распределения мощностных потоков между потребителями МЭК.

Новая тягово-энергетическая концепция развития мобильной техники позволит полностью реализовать общие технические требования в мобильном МЭК решить проблему разработки и внедрения мобильных МЭК.

На основе анализа проблем, стоящих перед мобильной техникой в отраслях АПК, сформулированы основные технические требования к мобильным МЭК:

1) многофункциональность;

2) модульная компоновка на основе типизации и конструктивной унификации;

3) многотопливность, энергоэффективность;

4) энергонасыщенность мобильного энергетического средства выше 20 кВт/т;

5) утилизация сбросового тепла;

6) автономная работа энергетических модулей;

7) согласованность характеристик мобильного энергетического средства (энергетического модуля), технологических модулей и тяговых модулей;

8) высокий коэффициент использования времени смены;

9) возможность параллельной работы мобильного МЭК с энергосистемой;

10) возможность применения мобильного МЭК в качестве резервного источника энергии;

11) обеспечение высокого качества получаемой электрической и тепловой энергии;

12) надежность, ресурс и эффективность функционирования мобильных МЭК;

13) типизация и унификация мобильного парка для отраслей АПК, энергетического обо-

рудования и комплектующих, топлив и моторных масел;

14) топливная экономичность, затраты на техническое обслуживание и ремонт;

15) оптимальное уплотнение двигателями почвы;

16) устойчивость движения МЭК;

17) защита окружающей среды при использовании энергетического оборудования;

18) ремонтпригодность;

19) транспортабельность;

20) высокий уровень интеллектуализации и роботизации;

21) демпфирование колебаний в конструкции.

В связи с этим оценка эффективности применения МЭК должна решаться в многокритериальной постановке.

3. Постановка задачи многокритериальной оптимизации

Для решения задачи установления весовости критериев качества МЭК-конструктивных и функциональных свойств МЭК требуется определить математические модели этих критериев. В ряде случаев они не поддаются формализации, то есть найти математические зависимости критериев качества от варьируемых параметров невозможно. Тогда необходимо проведение экспертного анализа критериев качества

Программа экспертного анализа заключалась в том, чтобы с помощью группы экспертов из 18 критериев качества и 7 функциональных ограничений выбрать наиболее значимые для оценки эффективности роботизации с позиций критериев качества МЭК.

В основу экспертного анализа положена методика расчета коэффициента конкордации по каждой группе факторов как меры согласованности группы экспертов. В качестве экспертов выбраны ведущие специалисты РФ с научными степенями от кандидатов до докторов технических наук, в том числе в звании академиков в области робототехники Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, а также специалисты других НИИ и КБ. В экспертизе участвовали независимо друг от друга 30 человек.

Степень согласованности мнений группы экспертов по важности факторов в соответствии с поставленной задачей определяет коэффициент конкордации. Он вычисляется по формуле

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3-n)},$$

где S – сумма квадратов разности между суммой рангов, присвоенных всеми экспертами каждому фактору, и средним значением сумм рангов всех факторов; n – число факторов; m – число экспертов в группе.

$$S = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m R_{ij})^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij})^2}{n},$$

где R_{ij} – ряд в группе после ранжирования по значимости.

Кроме того, коэффициент конкордации Кендалла, или коэффициент множественной ранговой корреляции, нужен для того, чтобы выявить согласованность мнений экспертов по нескольким факторам.

Чтобы определить значимость коэффициента конкордации, найдем критерий согласованности Пирсона.

$$X^2 = \frac{12S}{mn(n+1)} = n(m-1)W;$$

$$W = 0,13;$$

$$X^2 = 66,4;$$

$$X_{\text{табл}}^2 = 27,5.$$

Анализ полученных данных позволил определить степень согласованности мнений экспертов, которая оказалась слабой. Однако вычисленный X^2 после сравнения с табличным значением для числа степеней свободы $K = 17$ и при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ показал, что рассчитанный W – величина не случайная, а потому полученные результаты имеют смысл, обладают научной новизной и могут использоваться в дальнейших исследованиях.

Анализ результатов экспертной оценки установил, что наиболее значимы три критерия:

- 1) совокупные затраты на эксплуатацию МЭК;
- 2) суммарные затраты на технический осмотр и ремонт;
- 3) энергоэффективность.

Очень близки к этой группе факторов оказались производительность и давление движителей на почву.

Все выбранные критерии качества и функциональные ограничения играют большую роль при оценке эффективности МЭК с применением многокритериальной постановки задачи.

Применение мобильных МЭК даст возможность не только оптимально распределить его сцепную массу и тяговое усилие по полю, но и снять ограничение на мощность и массу комплекса, которые будут зависеть от планируемой его производительности и размеров поля. Большую роль будут играть активные рабочие органы, имеющие электропривод. Это позволит максимально повысить энергонасыщенность комплекса, которая напрямую связана с его производительностью, тягово-сцепными свойствами, металлоемкостью и потерями мощности на самопередвижение.

Таким образом, широкомасштабное внедрение мобильных многофункциональных энерго-технологических комплексов для нужд АПК на основе тягово-энергетической концепции обеспечит надежность, экологическую, энергетическую и экономическую эффективность, конкурентоспособность на мировом уровне. В разы увеличится производительность труда в АПК, повысится плодородие почвы, сократится негативное воздействие на окружающую среду, значительно уменьшится металлоемкость мобильных комплексов, снизится себестоимость сельхозпроизводства, повысится топливная экономичность, что создаст рабочие места в сельском хозяйстве и обеспечит население качественной и безопасной пищевой продукцией. Это позволит совершить прорыв в экономике АПК и заложить предпосылки для освоения более 30,0 млн га пахотной земли.

Заключение

Повсеместное внедрение интеллектуальных МЭК в растениеводстве даст возможность в кратчайшие сроки освоить и ввести в севооборот десятки миллионов пашен в сельском хозяйстве с минимальными энергетическими и экологическими затратами. Разработка эффективных принципов и способов интеграции МЭК повысит производительность и надежность интегрированных энергетических систем и изолированных энергорайонов, а также поспособствует реализации в полном объеме функционала «активного потребителя».

Список литературы

1. Андреев В.М., Баринев В.А., Варфоломеев С.Д., Годжаев З.А., Гришин В.И., Дьяконов А.А., Есяков С.Я., Лачуга Ю.Ф., Каляев И.А., Лукин К.А., Матюхин В.Ф., Панченко В.Я., Редько И.Я., Рокецкий Л.Ю., Сигов А.С., Стенников В.А., Шестаков А.Л., Цивадзе А.Ю. Создание

комплексных интегрированных систем энергоснабжения на базе инновационных технологий в условиях, происходящих в мире процессов // *Электричество*. 2020. № 3. С. 4–12. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-3-4-12>

2. Редько И.Я., Малоземов А.А., Малоземов Г.А., Наумов А.В., Козьминых Д.В. Эффективность использования инверторных энергоустановок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 244–253. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-244-253>

3. Лачуга Ю.Ф., Стребков Д.С., Годжаев З.А., Редько И.Я. Электрификация сельскохозяйственных мобильных энергосредств на основе тягово-энергетической концепции развития техники // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 260–270. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>

4. Годжаев З.А., Годжаев Т.З., Малахов И.С. Настоящее и будущее сельскохозяйственных автомобилей на электротяге // *Силовая энергетика и электроника перспективных автомобилей: материалы Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред. В.И. Прядкин*. Воронеж, 2021. С. 4–9. http://doi.org/10.34220/PEEPC2021_4-9

5. Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Кузьмин В.А. Перспективные проекты по созданию роботизированных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения // XII мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019) (Дивноморское, Геленджик, 23–28 сентября 2019 г.): материалы: в 4 т. Т. 2. Ростов н/Д – Таганрог, 2019. С. 127–129.

6. Годжаев З.А., Шевцов В.Г., Лавров А.В., Зубина В.А. Сельскохозяйственный тракторный парк как объект цифровизации // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. № 4 (33). С. 88–96.

7. Годжаев З.А., Лачуга Ю.Ф. Энергоэффективные мобильные многофункциональные тяговые и транспортно-технологические средства цифрового сельского хозяйства // *Энергосбережение и энергоэффективность – динамика развития: IX Международный конгресс: сборник тезисов докладов*. СПб., 2019. С. 53–56.

8. Годжаев З.А. Создание высокоэффективных автоматизированных электроприводов для транспортно-технологических средств АПК // *Прогресс транспортных средств и систем – 2018: материалы международной научно-практической конференции*. Волгоград, 2018. С. 36–42.

9. Kotiev G.O., Gumerov I.F., Stadukhin A.A., Kositsyn B.B. Selection of the required deceleration for high-mobility wheeled vehicles with wear resistant brake systems // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 879. 0012030. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/819/1/012030>

10. Kotiev G., Padalkin B., Miroshnichenko A., Stadukhin A., Kositsyn B. A theoretical study on the highspeed electric tracked vehicle mobility // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 820. 00122012. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012012>

References

1. Andreyev VM, Barinov VA, Varfolomeyev SD, Godzhaev ZA, Grishin VI, Dyakonov AA, Yesyakov SYa, Lachuga YF, Kalyayev IA, Lunin KA, Matyukhin VF, Panchenko VYa, Redko IYa, Roketskiy LYu, Sigov AS, Stennikov VA, Shestakov AL, Tsvadze AYu. Development of comprehensive integrated power supply systems with the use of innovation technologies under the conditions of processes occurring around the world. *Elektrichestvo*. 2020;(3):4–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-3-4-12>

2. Redko IYa, Malozemov AA, Malozemov GA, Naumov AV, Kozminykh DV. Efficiency of using inverter power plants as part of multifunctional energy technology complexes. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):244–253. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-244-253>

3. Lachuga YuF, Strebkov DS, Godzhaev ZA, Redko IYa. Electrification of agricultural mobile power facilities based on the traction and energy concept of technology development. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):260–270. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>

4. Godzhaev ZA, Godzhaev TZ, Malakhov IS. Present and future of agricultural electric vehicles. In: Pryadkin VI. (ed.) *Power Engineering and Electronics of Promising Cars: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Voronezh; 2021. p. 4–9. http://doi.org/10.34220/PEEPC2021_4-9

5. Godzhaev ZA, Senkevich SE, Kuzmin VA. Promising projects for the creation of robotic mobile energy facilities for agricultural purposes. *Materials of the XII Multi-Conference on Management Problems (ICPU-2019) (Divnomorskoe, Gelendzhik, 23–28 September 2019)* (vol. 2). Rostov-on-Don, Taganrog; 2019. p. 127–129. (In Russ.)

6. Godzhaev ZA, Shevtsov VG, Lavrov AV, Zubina VA. Agricultural tractor park as an object of digitalization. *Innovations in Agriculture*. 2019;(4(33)):88–96. (In Russ.)

7. Godzhaev ZA, Lachuga YuF. Energy-efficient mobile multifunctional traction and transport-technological means of digital agriculture. *Energy Saving and Energy Efficiency – Dynamics of Development: IX International Congress: a collection of Abstracts of Pre-Treasures*. St. Petersburg; 2019. p. 53–56. (In Russ.)

8. Godzhaev ZA. Creation of highly efficient automated electric drives for transport and technological

means of agriculture. *Progress of Vehicles and Systems – 2018: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Volgograd; 2018. p. 36–42. (In Russ.)

9. Kotiev GO, Gumerov IF, Stadukhin AA, Kositsyn BB. Selection of the required deceleration for high-mobility wheeled vehicles with wear resistant brake systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engi-*

neering. 2020;879:0012030. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/819/1/012030>

10. Kotiev G, Padalkin B, Miroshnichenko A, Stadukhin A, Kositsy, B. A theoretical study on the high-speed electric tracked vehicle mobility. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;820:00122012. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012012>

Сведения об авторах

Лачуга Юрий Федорович, доктор технических наук, профессор, академик РАН, член Президиума РАН, академик РАСХН, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук, Российская академия наук, Российская Федерация, 119334, Москва, Ленинский пр-кт, д. 32А. Scopus Author ID: 57213157355, eLIBRARY SPIN-код: 1128-3299. E-mail: akadema1907@mail.ru

Годжаев Захид Адыгезалович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заместитель директора, Федеральный научный агроинженерный центр, Всероссийский институт механизации, Российская Федерация, 109428, Москва, 1-й Институтский пр-д, д. 5. ORCID: 0000-0002-1665-3730, Scopus Author ID: 57115314500, eLIBRARY SPIN-код: 1892-8405. E-mail: fic51@mail.ru

Редько Иван Яковлевич, доктор технических наук, профессор, руководитель направления стратегии развития электроэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Российская Федерация, 454080, Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76. ORCID: 0000-0002-0259-1268, Scopus Author ID: 6603047041, eLIBRARY AuthorID: 420014. E-mail: redko_itya@mail.ru

About the authors

Yury F. Lachuga, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Academician of the Russian Academy of Agricultural Sciences, Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences, Russian Academy of Sciences, 32A Leninsky Prospekt, Moscow, 119334, Russian Federation. Scopus Author ID: 57213157355, eLIBRARY SPIN-code: 1128-3299. E-mail: akadema1907@mail.ru

Zahid A. Godzhaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director, Federal Scientific Agroengineering Center, All-Union Research Institute of Agricultural Mechanization, 5 1-i Institutskii Proezd, Moscow, 109428, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1665-3730, Scopus Author ID: 57115314500, eLIBRARY SPIN-code: 1892-8405. E-mail: fic51@mail.ru

Ivan Ya. Redko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electric Power Industry Development Strategy, South Ural State University, 76 Prospekt Lenina, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-0259-1268, Scopus Author ID: 6603047041, eLIBRARY AuthorID: 420014. E-mail: redko_itya@mail.ru