



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270

УДК 631.171

Научная статья

Электрификация сельскохозяйственных мобильных энергосредств на основе тягово-энергетической концепции развития техники

Ю.Ф. Лачуга^а, Д.С. Стребков^б, З.А. Годжаев^б, И.Я. Редько^с^аОтделение сельскохозяйственных наук РАН, Российская Федерация, 119334, Москва, Ленинский пр-кт, д. 32А^бФедеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Российская Федерация, 109428, Москва, 1-й Институтский пр-д, д. 5^сАО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского», Российская Федерация, 119071, Москва, Ленинский пр-кт, д. 19

История статьи:

Поступила в редакцию: 12 декабря 2020 г.

Доработана: 27 января 2021 г.

Принята к публикации: 30 января 2021 г.

Ключевые слова:

многофункциональные энерготехнологические комплексы, МЭК, тягово-энергетическая концепция, дифференцированный метод, оценка энергетической эффективности, использование альтернативных топлив, конструктивно-компоновочные решения, мобильные МЭК, электропривод рабочих органов, электротрансмиссия ходовой системы, мобильные энергетические средства, МЭС

Аннотация. Важной составляющей комплексных интегрированных систем энергоснабжения является электрификация мобильных энергосредств АПК, которая в значительной мере будет влиять на синтез энергетических систем. Основой мобильных энергосредств выступают многофункциональные энерготехнологические комплексы (МЭК) тягово-энергетической концепции с многоканальным распределением энергетических потоков различной физической природы. На основе логического анализа мобильного МЭК построена технологическая схема, состоящая из трех подсистем: 1) факторов внешних условий; 2) общих конструктивно-компоновочных решений; 3) энергетических и эксплуатационных свойств мобильного МЭК. Между этими подсистемами и элементами системы установлены энергетические связи. Разработаны дифференцированный метод оценки энергетической эффективности использования альтернативных топлив и оригинальная математическая модель обобщенного мобильного МЭК, которые позволят уже на этапе проектирования определить тип МЭК, оптимальные конструктивно-компоновочные решения, режимы работы и параметры.

Введение

Идея электрификации полеводства получила свое развитие в первые годы существования советской власти. Вначале это был электропахот-

ный агрегат канатной тяги. Председатель правительства В.И. Ленин присутствовал на испытаниях электроплуга на Бутырском хуторе в Москве 22 октября 1921 года. В ВИЭСХе эти работы получили развитие под руководством академика П.Н. Листова и В.Г. Стеценко. За 1937–1956 годы был создан ряд электротракторов, зерноуборочных комбайнов, самоходных электрокосилок, передвижных трансформаторных подстанций, мобильных электроагрегатов автономного питания. В 1970–1990 годах проведены работы по оптимизации полевых электрических сетей, созданию электрооборудования для них. Разработаны мобильная малогабаритная электрифицированная техника, мостовые электрифицированные системы, системы централизованного электроснабжения дождевальными машинами, электрофизические уста-

Лачуга Юрий Федорович, академик-секретарь ОЦХН РАН, академик РАН, член Президиума РАН, д. т. н., профессор; eLIBRARY SPIN-код: 1128-3299, Scopus Author ID: 57213157355.

Стребков Дмитрий Семенович, главный научный сотрудник ФНАЦ ВИМ, академик РАН, д. т. н., профессор; eLIBRARY SPIN-код: 2864-5630, Scopus Author ID: 7004652438.

Годжаев Захид Адыгезалович, заместитель директора ФНАЦ ВИМ, член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор; eLIBRARY SPIN-код: 1892-8405, Scopus Author ID: 57115314500, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>; fic51@mail.ru.

Редько Иван Яковлевич, заместитель генерального директора АО «ЭНИН», д. т. н., профессор; eLIBRARY AuthorID: 420014, Scopus Author ID: 6603047041.

© Лачуга Ю.Ф., Стребков Д.С., Годжаев З.А., Редько И.Я., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

новки для предпосевной и послеуборочной обработки семян, борьбы с сорняками, стационарные и передвижные комплексы для обмолота и переработки урожая зерновых культур и трав, широкозахватные, многофункциональные мобильные электроагрегаты, освоено их производство. Здесь нужно отметить плодотворное сотрудничество ВИЭСХа с ВИМом [1].

В настоящее время в мире идут процессы трансформации энергетических систем, в результате которых создается их новая архитектура. К основным факторам, обуславливающим трансформацию энергетических систем, относятся значительное уменьшение стоимости генерации энергии и увеличение потребления электроэнергии, включая ветро-солнечные электростанции, распределенную генерацию, электротранспорт, электрификацию мобильных энергосредств АПК, систему управления накоплением энергией, энергообеспечение цифровизации производства. Важным направлением этой трансформации является развитие распределенной генерации на базе различных источников энергии и их интеграция в энергетические системы, в том числе: на базе многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК), использующих все многообразие местных энергетических ресурсов; на основе аэрокосмических МЭК; мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов для АПК.

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, режимов работы и конструктивно-компоновочных решений мобильной техники по критериям энергетической, функциональной и экономической эффективности [2; 3].

На основе существующей тяговой концепции создания мобильной техники эти проблемы адекватно решить невозможно. Новая тягово-энергетическая концепция развития мобильной техники позволит полноценно решить проблему разработки и внедрения мобильных МЭК. Применение мобильных МЭК даст возможность не только оптимально распределить сцепную массу и тяговое усилие по полю, но и снять ограничение на мощность и массу комплекса, которые

будут зависеть от его планируемой производительности и размеров поля. Большую роль будут играть активные рабочие органы, имеющие электропривод на базе автономных источников энергии. Это позволит максимально повысить энергонасыщенность комплекса, которая напрямую связана с его производительностью, тягово-сцепными свойствами, металлоемкостью и потерями мощности на самопередвижение [4].

Энергетическая и экологическая эффективность МЭК во многом зависит от показателей ДВС, режимы функционирования которого в составе МЭК имеют эксплуатационные особенности. В отношении оптимизации традиционного рабочего цикла и процессов, его составляющих, при использовании альтернативных, в том числе водородных и смесевых, топлив повышение эффективности научных исследований при создании модификаций поршневых ДВС для МЭК возможно посредством применения имитационного моделирования и цифровых двойников, позволяющих существенно сократить затраты времени и средств на проектирование, проведение натурных испытаний и конструктивно-доводочных работ. Увеличение производительности МЭК достигается за счет реализации их эффективной работы в составе энергетических систем или в автономных режимах [5–9].

Китай и Великобритания объявили о решении ввести запрет на продажу бензиновых и дизельных автомобилей с 2035 года, Исландия, Ирландия, Израиль, Словения и Нидерланды – с 2030 года, Норвегия – с 2025 года. Развитие электротранспорта сдерживается отсутствием инфраструктуры для зарядки и высокоэффективных дешевых аккумуляторов с большим сроком службы.

По прогнозам российских ученых, стоимость аккумуляторных батарей для электротранспорта уменьшится со 165 долл./кВт в 2019 году до 100 долл./кВт в 2024 году.

По прогнозу МЭА, в 2030 году в мире появится 120 млн электротранспортных средств, для которых потребуется более одного миллиона зарядных станций. Для зарядных станций на переменном токе используется силовое оборудование, установленное на электротранспортном средстве. Электрическая мощность оборудования для зарядки электробуса или электротрактора – 30–50 кВт.

Известные бесконтактные методы передачи электрической энергии на транспортное средство с помощью электромагнитной индукции

сопровожаются значительными потерями в линии из-за большого индуктивного сопротивления проводов токам высокой частоты. При высокой частоте в витках обмотки приемника и в кабельной линии возникает ЭДС самоиндукции, направленная встречно по отношению к напряжению питающей тяговой подстанции, что существенно снижает КПД передачи, а применяемые методы борьбы с этими явлениями усложняют и удорожают всю систему передачи электрической энергии. В настоящее время разработаны методы электроснабжения электротранспорта по однопроводниковой волноводной линии на повышенной частоте с использованием однопроводниковой изолированной линии с бесконтактным троллеем.

Резонансный бестроллейный метод электроснабжения электротранспорта основан на физическом принципе, который до настоящего времени не использовался при передаче электрической энергии. В предлагаемом бесконтактном троллее вместо явления электромагнитной индукции и передачи электроэнергии через воздушный трансформатор используется явление электростатической индукции с передачей электроэнергии через воздушный конденсатор. Разработаны экспериментальные модели электромобиля, которые получают энергию от однопроводниковой изолированной кабельной линии, проложенной в дорожном покрытии [10; 11].

Использование однопроводниковой линии с бесконтактным троллеем для электроснабжения электротранспорта не имеет принципиальных ограничений по протяженности линии. Разрабатываемые техника и технология могут быть использованы для электроснабжения любых наземных транспортных средств: электромобилей, электрогрузовиков, электробусов, тракторов, железнодорожного электротранспорта и т. д. Однопроводниковая линия выполняется изолированной, она безопасна в отличие от голого контактного провода при троллейном способе электроснабжения и более надежна благодаря отсутствию коротких замыканий, износа и искрения.

Беспроводное электроснабжение во время движения позволяет снизить в 5–10 раз емкость аккумуляторов и в 2 раза стоимость электромобилей [10; 11].

Результаты и обсуждение

Широкомасштабное внедрение мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов для нужд АПК на основе тягово-энерге-

тической концепции позволит обеспечить надежность, экологическую, энергетическую и экономическую эффективность, конкурентоспособность на мировом уровне, в разы увеличить производительность труда в АПК, создать рабочие места в сельском хозяйстве, повысить плодородие почвы, топливную экономичность, снизить негативное воздействие на окружающую среду, себестоимость сельхозпроизводства, значительно уменьшить металлоемкость мобильных комплексов, снабдить население качественной и безопасной пищевой продукцией. Это позволит совершить прорыв в экономике АПК и создать предпосылки для освоения более 30,0 млн га пахотной земли.

Для достижения данных целей необходимо решить следующие задачи:

1) создать условия для повышения эффективности производства, максимальной занятости населения в сельском хозяйстве за счет:

- вовлечения в оборот в ближайшее десятилетие десятков миллионов га неиспользуемых сельхозугодий;

- конструирования энергетических установок нового поколения;

- создания и реализации тягово-энергетической концепции развития средств механизации, электрификации и цифровизации сельского хозяйства;

- разработки принципиально новых общих конструктивно-компоновочных решений мобильных комплексов, применяемых в АПК;

2) разработать математическую модель обобщенного МЭК, в том числе тягово-энергетической концепции, с множеством каналов передачи энергии к потребителям различной физической природы (n -каналов на тяговые модули, m -каналов на активные рабочие органы и k -каналов на технологии преобразования энергии), которая станет основой для интеллектуализации технологических (производственных) процессов в сельском хозяйстве;

3) обосновать и оптимизировать общие конструктивно-компоновочные решения мобильных МЭК различных типов с использованием водородных и многотопливных поршневых ДВС в зависимости от конкретных условий их эксплуатации по критериям энергетической, технико-экономической эффективности и экологической безопасности. Применение водородных и многотопливных поршневых ДВС даст возможность сформировать новые источники и способы хранения энергии;

4) обеспечить многофункциональность и многоготовливность ДВС, что позволит перейти к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике;

5) усовершенствовать структуру и распределение мощностных потоков и сцепной массы в мобильном МЭК на основе использования его математической модели;

6) разработать комплексную имитационную сопряженную мультидоменную математическую модель поршневого ДВС для МЭК, включающую все его основные механизмы и системы, на основе метода энергетического и массового баланса;

7) определить методы оптимизации функционирования МЭК с поршневым ДВС в его составе для повышения топливной экономичности, снижения тепломеханической нагруженности и выбросов вредных веществ с отработавшими газами в окружающую среду;

8) сформулировать принципы управления и интеллектуализации МЭК;

9) установить основания и способы интеграции МЭК в состав энергетических систем и изолированных энергорайонов для повышения надежности и эффективности их функционирования в интегрированных энергетических системах, в том числе посредством полноценного использования функционала «активного потребителя».

В результате реализации поставленных задач планируется создание и внедрение интеллектуальных мобильных МЭК с применением новей-

ших инновационных технологий и систем интеллектуального управления. Разработанный дифференцированный метод оценки энергетической эффективности использования альтернативных топлив и оригинальная математическая модель обобщенного мобильного МЭК с множеством каналов передачи энергии различной физической природы позволят уже на этапе проектирования определить тип МЭК, оптимальные конструктивно-компоновочные решения (рис. 1 и 2), режимы работы и параметры. Новые технические (конструктивно-компоновочные) решения позволят оптимизировать распределение сцепной массы комплекса между мобильным энергетическим средством и тяговыми модулями, что обеспечит минимальное воздействие двигателей МЭК на почву [6].

Оптимизация рабочего цикла поршневого ДВС, работающего на альтернативных, в том числе водородных, и смесевых топливах, обеспечит повышение его управляемости, топливной экономичности при сохранении мощностных и ресурсных показателей, а также снизит выбросы вредных веществ в окружающую среду. Применение методов имитационного моделирования рабочего цикла и работы систем поршневых ДВС существенно повысит эффективность НИР и ОКР по созданию МЭК за счет использования процедуры оптимизации, повышения точности расчетов, многократного снижения затрат на проведение натурных испытаний.

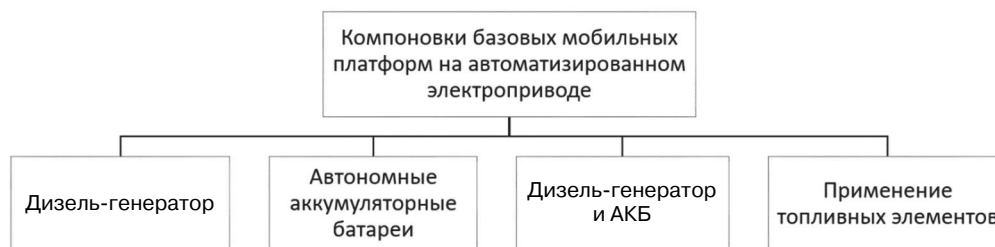


Рис. 1. Схема возможных вариантов компоновки базовых мобильных платформ на автоматизированном электроприводе

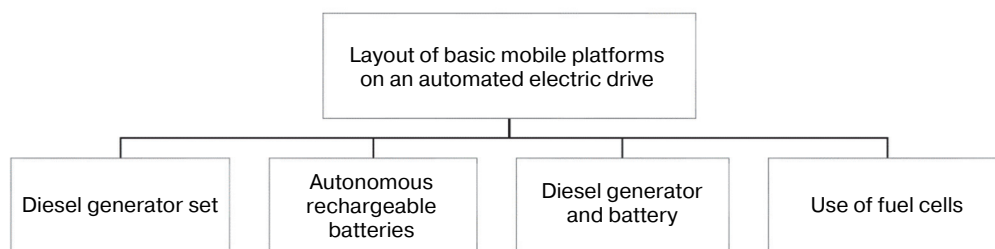


Figure 1. Diagram of possible layout options for basic mobile platforms on an automated electric drive



Рис. 2. Характерные компоновки роботизированной базовой мобильной платформы на автоматизированном электроприводе

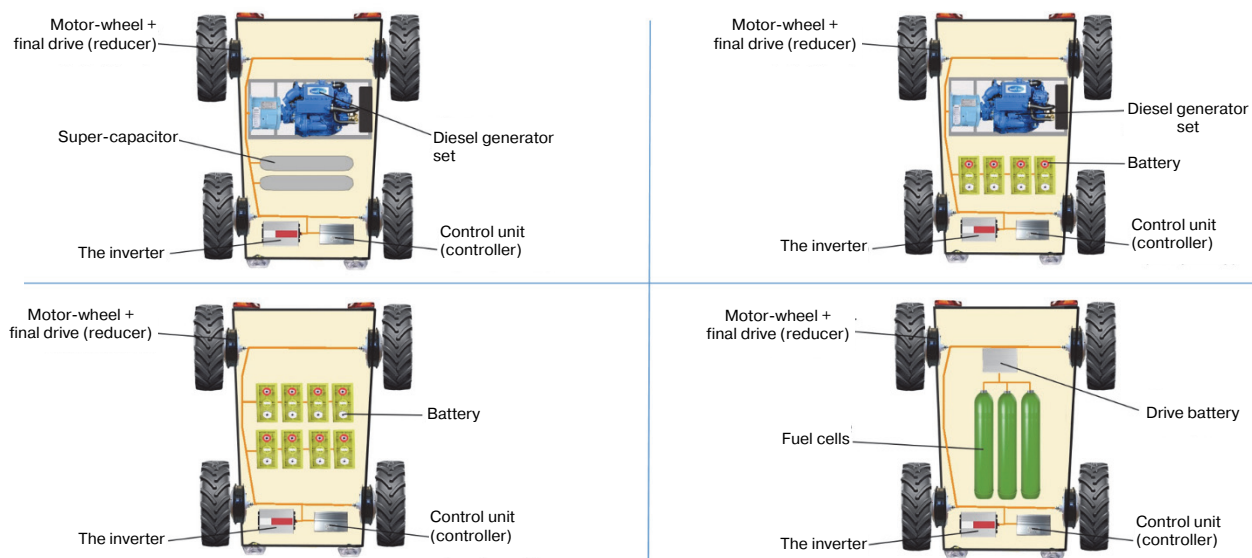


Figure 2. Typical layouts of a robotic base mobile platform on an automated electric drive

Повсеместное внедрение интеллектуальных МЭК в растениеводстве позволит в кратчайшие сроки освоить и ввести в севооборот десятки миллионов пашен в сельском хозяйстве с минимальными энергетическими и экологическими затратами [12; 13]. Разработка эффективных принципов и способов интеграции МЭК даст возможность повысить эффективность и надежность интегрированных энергетических систем и изолированных энергорайонов, а также в полном объеме реа-

лизовать функционал «активного потребителя». Это выражается в следующем:

- значительное повышение производительности и топливной экономичности МЭК;
- снижение экологического воздействия МЭК на окружающую среду за счет утилизации отходов сельхозпроизводства, уменьшения уплотнения почвы и выбросов вредных веществ с обработанными газами;

– повышение энергетической эффективности МЭК в результате оптимизации и совершенствования управления распределением мощности между потребителями (тяга, активные рабочие органы и др.) с целью обеспечения возможности осуществления за один проход нескольких технологических операций;

– с точки зрения топливной экономичности оптимизация режимов функционирования ДВС путем применения автоматизированного электропривода и экологически безопасной ходовой системы;

– повышение энергетической эффективности МЭК за счет реализации возможности их надежной и эффективной работы в составе энергетических систем и изолированных энергорайонов, а том числе посредством полноценного использования функционала «активного потребителя»;

– создание стационарных и мобильных агропонно-фитотронных биотехнологических комплексов вокруг и внутри мегаполисов, которые позволяют круглогодично, не зависимо от сезонности и климатических условий, функционировать и производить высококачественные, экологически безопасные свежие овощи и зеленные культуры.

Для достижения поставленных задач в ближайшее время необходимо разработать:

1) тягово-энергетическую концепцию развития средств электрификации и интеллектуализации для сельского хозяйства, реализация которой обеспечит значительное повышение урожайности сельскохозяйственных культур и производительности труда, снижение уплотнения почвы и удельного расхода топлива, расширение многофункциональности и многотопливности;

2) оригинальную математическую модель на основе дифференцированного метода оценки энергетической эффективности использования различных видов топлив, которая позволит определить тип МЭК, оптимизировать основные конструктивно-компоновочные решения (мощность, эксплуатационная масса, энергонасыщенность, скорость и ширина захвата МЭК), КПД звеньев, каналов передачи энергии в МЭК, оптимальные режимы и параметры МЭК и любого его звена, эксплуатационные свойства, в том числе на этапе проектирования МЭК;

3) систему критериев энергетической эффективности обобщенного МЭК на основе его математической модели, которая позволит обосновать область его эффективного применения;

4) принципы управления, а также принципы и способы интеграции МЭК в состав энергетических систем и изолированных энергорайонов для повышения надежности и эффективности их функционирования;

5) оригинальную комплексную имитационную сопряженную мультидоменную математическую модель поршневого ДВС для МЭК, включающую все его основные механизмы и системы, а при возможности – цифровой двойник ДВС;

6) методы оптимизации рабочих циклов в камере сгорания поршневых ДВС, работающих на альтернативных топливах, с применением трехмерных CFD-моделей, кинетических механизмов окисления альтернативных топлив и методы оптимизации режимов функционирования поршневого ДВС в составе МЭК для повышения топливной экономичности, снижения тепломеханической нагруженности и выбросов вредных веществ с отработавшими газами в окружающую среду.

Научная новизна этой работы будет заключаться в разработке:

– технологической схемы обобщенного МЭК, в том числе тягово-энергетической концепции развития средств механизации и электрификации растениеводства с множеством каналов передачи энергии к потребителям различной физической природы;

– дифференцированного метода оценки энергетической эффективности использования различных видов топлив в многофункциональных энерготехнологических комплексах;

– технологии имитационного моделирования поршневых двигателей внутреннего сгорания в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов, включающей рациональные (с позиции соответствия имитационной модели решаемым практическим задачам) универсальные методы создания имитационных моделей с учетом особенностей конструкции, эксплуатации и целей создания;

– принципов и способов интеграции МЭК в состав энергетических систем и изолированных энергорайонов.

Реализация тягово-энергетической концепции развития мобильной техники предполагает ее переход на более высокий технический уровень. К наиболее высокому уровню развития такой техники можно отнести мобильные МЭК модульного типа. Под многофункциональностью следует понимать возможность подобного комплекса произво-

дить из местных топливно-энергетических ресурсов моторные топлива, электрическую и тепловую энергию. Использование местных энергоресурсов позволит решить многие вопросы энергоснабжения сельских поселений, обеспечения топливной независимости, улучшения социально-экономической и экологической обстановки среды обитания.

Суть новой концепции развития мобильной техники заключается:

- в разнесении сцепной массы по контактной поверхности взаимодействия машины с почвой;
- реализации многофункциональности, много-топливности, модульного построения МЭК;
- разработке и реализации единого обобщенного универсального унифицированного типового проекта, который отвечал бы современным техническим требованиям, предъявляемым к мобильным МЭК;
- согласованности характеристик энергетических, технологических и тяговых модулей, в том числе ДВС, силовых генераторов, активных рабочих органов и электрических трансмиссий ходовых систем модулей, потребителя нагрузок и других модулей.

Применение мобильных МЭК тягово-энергетической концепции обуславливает использование новой конструктивно-компоновочной схемы с многоканальным распределением энергетических потоков различной физической природы. Мобильный МЭК является той основой, которая позволит объединить все типы мобильных энергетических средств (МЭС), предназначенных для производства прежде всего электрической энергии и создания тяги. Это объединение должно выполняться в соответствии с мощностным рядом МЭС с использованием серийно выпускаемых энергоустановок и на основе оптимального согласования технических характеристик всех элементов МЭК по максимуму его полного КПД.

В основу разработки предлагаемой концепции была положена математическая модель обобщенной автономной системы энергоснабжения с множеством каналов передачи энергии различной физической природы к потребителю, что позволит решить следующие задачи:

1) объединить на основе технологической схемы системы генерации и каналы передачи электрической энергии, тепла и механической мощности, а также потребителей электроэнергии, тепла и тяговой мощности в единую автоматизированную систему.

2) количественно и качественно оценить энергетический процесс производства, передачи и потребления электроэнергии, тепла и тяговой мощности в реальном масштабе времени на основе сквозного энергетического анализа;

3) управлять и оптимизировать режимы работы и показатели качества всех элементов мобильного МЭК, работающих на различных видах топлива: системы генерации электроэнергии и тепла; системы передачи и распределения электрической, тепловой и механической энергии; системы потребления электроэнергии, тепла и тяговой мощности в соответствии с критериями энергетической эффективности функционирования мобильного комплекса.

4) совершенствовать структуры и распределение мощностных потоков различной физической природы в распределенных системах генерации на основе использования математических моделей функционирования мобильного МЭК;

5) мониторить, контролировать и улучшать параметры и режимы работы мобильных МЭК в сельских поселениях России, принимая на этой основе оптимальные управленческие решения по повышению эффективности их функционирования, а также обосновывать их выбор на стадии проектирования в зависимости от местных условий эксплуатации энергоустановок.

При разработке математической модели был применен разработанный нами дифференцированный метод оценки энергетической эффективности использования моторных топлив в мобильных МЭК. Его суть заключается в том, что мобильный МЭК может быть представлен в виде технологической схемы обобщенного многофункционального энерготехнологического комплекса со множеством каналов поступления и потребления энергии различной физической природы. В свою очередь, мобильный МЭК – это комплекс, состоящий из:

- МЭС на базе многотопливной электростанции и электротрансмиссии с мотор-колесами;
- технологического средства с набором активных рабочих органов и электронно-ионных технологий;
- тяговых модулей, участвующих в создании тяги МЭК.

При этом технологическая схема мобильного МЭК, построенная на основе логического анализа, состоит из трех подсистем:

- 1) факторов внешних условий;
- 2) общих конструктивно-компоновочных решений;
- 3) энергетических и эксплуатационных свойств мобильного МЭК.

Между этими подсистемами и элементами системы установлены энергетические связи. Следует отметить, что к подсистеме факторов внешних условий относятся, прежде всего, климатические условия – температура, плотность и влажность воздуха, показатели качества энергоресурсов, в том числе теплота сгорания различных топлив, параметры почвы, размеры поля и др.

К подсистеме общих конструктивно-компоновочных решений относятся типы МЭК и энергоустановок, элементы системы – ДВС, генераторы, редукторы, каналы передачи энергии и др.

К подсистеме энергетических и эксплуатационных свойств относятся: показатели качества электрической и тепловой энергии; мощность системы, ДВС, технологического средства, тяговых модулей, системы утилизации тепла, силовых генераторов, электропривода, преобразователей частоты, накопителей энергии; частота вращения ДВС, силовых генераторов, трансмиссий электростанции, ходовых систем; момент ДВС и основных модулей; часовой и удельный расходы топлива ДВС, основных модулей и МЭК в целом; КПД мобильного МЭК, модулей и каналов передачи мощности к потребителям; тяговый КПД МЭК, коэффициент использования мощности МЭК и модулей; коэффициенты распределения мощности МЭК между модулями и потребителями; массогабаритные показатели МЭК и модулей и др.

Особенность разработки данной модели мобильного МЭК заключается в представлении математического описания энергетических связей между элементами таким образом, чтобы оптимизация режимов работы системы происходила по максимуму ее полного КПД в зависимости от коэффициента распределения мощности на входе или на выходе этой системы. При этом оценка энергетической эффективности каждого элемента системы может быть представлена в виде его КПД в зависимости от распределения мощности между каналами ее передачи, режимов работы и его характеристик.

Математическая модель обобщенного мобильного МЭК позволяет:

– рассмотреть с единых позиций технологические и энергетические процессы при работе комплекса любого типа;

– наметить и реализовать пути повышения эффективности мобильных МЭК благодаря обоснованию оптимальных общих конструктивно-компоновочных решений, оптимизации скоростных и силовых режимов;

– дать комплексную оценку последствий принимаемых решений в части формирования эксплуатационных характеристик МЭК и определить качества комплексов и предпочтительные условия их использования.

С ее помощью можно не только разработать методику по определению оптимальных параметров мобильных МЭК, но и создать основу для проектирования интеллектуальных мобильных МЭК. Достоинства такой модели заключаются, прежде всего, в том, что оптимальные параметры мобильных МЭК в целом и элементов системы в частности определяются в автоматическом режиме в реальном масштабе времени при наличии необходимых количественных характеристик внешних условий.

Применение интеллектуальных мобильных МЭК обеспечит:

– экономию топлива за счет оптимизации режимов работы ДВС на 10–20 % в зависимости от нагрузки и ее колебаний;

– повышение коэффициента использования топлива с 0,4–0,45 до 0,8–0,9 за счет комплексной утилизации сбросового тепла ДВС;

– согласованность характеристик энергетических и тяговых модулей, в том числе ДВС, генератора и потребителя нагрузок (повышение КПД ДВС-электростанции на 10–20 %);

– высокое качество электрической и тепловой энергии независимо от колебаний нагрузки;

– высокий коэффициент загрузки ДВС.

Заключение

Электрификация мобильных энергосредств АПК – важная составляющая комплексных интегрированных систем энергоснабжения. Она в значительной степени может повлиять на синтез энергетических систем.

Решающим фактором в электрификации мобильных процессов в АПК является широкомасштабное внедрение мобильных МЭК в его отраслях.

Применение мобильных МЭК в сельскохозяйственном производстве обуславливает его переход на электропривод рабочих органов и электротрансмиссию ходовой системы МЭС.

Решение задачи по замене традиционных видов силовых приводов на электропривод имеет серьезное технологическое прорывное значение для повышения функциональной и энергетической эффективности мобильных энергетических средств и дальнейшей их роботизации, а также повышения производительности и рентабельности сельскохозяйственного производства.

Применение автоматизированного силового электропривода позволяет повышать энергоэффективность (высокое КПД), экологическую безопасность и маневренность машины, отказываться от сложных кинематических схем трансмиссий, снижать уровень вибрации и шума, обеспечивать бесступенчатое регулирование скорости агрегата, а также в некоторых вариантах отказаться от ДВС с низким КПД.

Список литературы

1. *Стребков Д.С.* История сельской электрификации // История науки и техники. 2019. № 12. С. 20–30.
2. *Самсонов В.А., Лачуга Ю.Ф.* Расчет оптимальных значений мощности и энергонасыщенности сельскохозяйственного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 7. С. 25–31.
3. *Смирнов А.А., Пикалов Н.А.* Определение потребной энергоемкости накопителей электробуса методами имитационного моделирования // Инженерный вестник. 2016. № 12. С. 5.
4. *Разуваев А.В., Редько И.Я.* Энергетическая безопасность объектов // Молодой ученый. 2015. № 23 (103). С. 37–39.
5. *Годжаев З.А., Крюковская Н.С., Сенькевич С.Е.* Разработка стенда для испытания системы управления беспилотным зерноуборочным комбайном // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2020. Т. 20. № 3. С. 5–14. <http://dx.doi.org/10.14529/engin200301>.
6. *Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Алексеев И.С., Лонин С.Э., Ильченко Е.Н.* Разработка математической модели колесного МЭС тягового класса 0,6–0,9 для исследований продольных колебаний при агрега-

тировании с опрыскивателем // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 4 (33). С. 162–169.

7. *Комиев Г.О., Горелов В.А., Бекетов А.А.* Математическая модель движения вездеходного транспортного средства // Журнал автомобильных инженеров. 2008. № 1 (48). С. 50–54.

8. *Gorelov V.A., Komissarov A.I.* Mathematical model of the straight-line rolling tire – rigid terrain irregularities interaction // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1322–1328. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.309>

9. *Volskaia N.S., Zhileykin M.M., Zakharov A.Y.* Mathematical model of rolling an elastic wheel over deformable support base // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 315. Article number 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/315/1/012028>

10. *Стребков Д.С., Шогенов А.Х., Шогенов Ю.Х., Моисеев М.В.* Перспективы развития передачи электроэнергии по однопроводной линии // Техника и оборудование для села. 2019. № 4 (262). С. 33–38. <http://dx.doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-33-38>.

11. *Стребков Д.С.* Резонансные методы электрооборудования бесконтактного высокочастотного электрического транспорта // Энергетический вестник. 2018. № 24. С. 46–63.

12. *Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х.* Развитие интенсивных машинных технологий, роботизированной техники, эффективного энергообеспечения и цифровых систем в агропромышленном комплексе // Техника и оборудование для села. 2019. № 6 (264). С. 2–9. <http://dx.doi.org/10.33267/2072-9642-2019-6-2-8>.

13. *Годжаев З.А., Измайлов А.Ю., Лачуга Ю.Ф., Шогенов Ю.Х.* Перспективы применения автоматизированных и роботизированных электроприводов на мобильных энергосредствах и рабочих органах сельхозмашин // Известия МГТУ МАМИ. 2018. № 2 (36). С. 41–47.

Для цитирования

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://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>

Electrification of agricultural mobile power facilities based on the traction and energy concept of technology development

Yurii F. Lachuga^a, Dmitry S. Strebkov^b, Zakhid A. Godzhaev^b, Ivan Ya. Redko^c

^aDepartment of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, 32A Leninsky Prospekt, Moscow, 119334, Russian Federation

^bFederal Scientific Agroengineering Center VIM, 5 1-i Institutskii Proezd, Moscow, 109428, Russian Federation

^cEnergy Institute of G.M. Krzhizhanovsky, 19 Leninsky Prospekt, Moscow, 119071, Russian Federation

Article history:

Received: December 12, 2020

Revised: January 27, 2021

Accepted: January 30, 2021

Keywords:

multifunctional energy technology complexes, MEC, traction and energy concepts, differentiated method, assessing the energy efficiency, using of alternative fuels, design and layout solutions of mobile MEC, electric drive of working bodies, electric transmission of the running system, mobile energy devices

Abstract. An important component of complex integrated energy supply systems is the electrification of mobile power facilities of the agro-industrial complex, which will significantly affect the synthesis of energy systems. The basis of mobile energy facilities are multifunctional energy technology complexes (MEC) of the traction-energy concept with multi-channel distribution of energy flows of different physical nature. Based on the logical analysis of the mobile MEC, a technological scheme consisting of three subsystems is constructed: 1) factors of external conditions; 2) general design and layout solutions; 3) energy and operational properties of the mobile MEC. Energy connections are established between these subsystems and the system elements. A differentiated method for evaluating the energy efficiency of using alternative fuels and an original mathematical model of the generalized mobile MEC have been developed, which will allow determining the type of MEC, optimal design and layout solutions, operating modes and parameters at the design stage.

References

1. Strebkov DS. History of rural electrification. *History of Science and Engineering*. 2019;(12):20–30. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.25791/intstg.12.2019.1078>.
2. Samsonov VA, Lachuga YuF. Calculation of optimal power and energy saturation of an agricultural tractor. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017;(7): 25–31. (In Russ.)
3. Smirnov AA, Pikalov NA. Opredelenie potrebnostj energoemkosti nakopitelej elektrobusa metodami imitacionnogo modelirovaniya [Determination of the required energy consumption of electric bus storage devices by

simulation methods]. *Engineering Bulletin*. 2016;(12):5. (In Russ.)

4. Razuvaev AV, Redko IYa. Energeticheskaya bezopasnost' ob"ektov [Energy security of facilities]. *Molodoj Uchenyj [Young Scientist]*. 2015;23(103):37–39. (In Russ.)

5. Godzhaev ZA, Kryukovskaya NS, Senkevich SE. Unmanned combine harvester control system test stand development. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*. 2020;20(3):5–14. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.14529/engin200301>.

6. Gojaev ZA, Senkevich SE, Alekseev IS, Lonin SE, Ilchenko EN. Development of a mathematical model of wheeled MES traction class 0.6–0.9 for studies of longitudinal vibrations when aggregated with a sprayer. *Innovacii v Sel'skom Hozyajstve [Innovations in Agriculture]*. 2019;4(33):162–169. (In Russ.)

7. Kotiev GO, Gorelov VA, Beketov AA. Matematicheskaya model' dvizheniya vezdekhodnogo transportnogo sredstva [Mathematical model of all-terrain vehicle movement]. *Zhurnal Avtomobil'nyh Inzhenerov [Journal of Automotive Engineers]*. 2008;1(48):50–54. (In Russ.)

Yurii F. Lachuga, Academician-Secretary of the DAS of the RAS, Academician of the Russian Academy of Sciences, member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY SPIN-code: 1128-3299, Scopus Author ID: 57213157355.

Dmitry S. Strebkov, chief research officer of the FSAC VIM, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY SPIN-code: 2864-5630, Scopus Author ID: 7004652438.

Zakhid A. Godzhaev, Deputy Director of the FSAC VIM, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY SPIN-code: 1892-8405, Scopus Author ID: 57115314500, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>; fic51@mail.ru.

Ivan Ya. Redko, Deputy General Director of JSC “ENIN”, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY AuthorID: 420014, Scopus Author ID: 6603047041.

8. Gorelov VA, Komissarov AI. Mathematical model of the straight-line rolling tire – rigid terrain irregularities interaction. *Procedia Engineering*. 2016;150:1322–1328. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.309>

9. Volskaia NS, Zhileykin MM, Zakharov AY. Mathematical model of rolling an elastic wheel over deformable support base. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018;315:012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/315/1/012028>

10. Strebkov DS, Shogenov AKh, Shogenov YuKh, Moiseev MV. Prospects for the development of single-wire power transmission. *Tekhnika i Oborudovanie dlya Sela [Machinery and Equipment for the Village]*. 2019;4(262):33–38. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-33-38>.

11. Strebkov DS. Rezonansnye metody elektrosnabzheniya beskontaktnogo vysokochastotnogo elektricheskogo transporta [Resonant methods of power supply of contactless high-frequency electric transport]. *Energeticheskij Vestnik [Energy Bulletin]*. 2018;(24):46–63. (In Russ.)

12. Lachuga YuF, Izmailov AYu, Lobachevsky YP, Shogenov YuH. Development of intensive machine technologies, robotic technology, efficient energy supply and digital systems in the agribusiness. *Tekhnika i Oborudovanie dlya Sela [Machinery and Equipment for the Village]*. 2019;6(264):2–9. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.33267/2072-9642-2019-6-2-8>.

13. Godzhaev ZA, Izmajlov AYu, Lachuga YuF, Shogenov YuH. Prospects for the use of automated and robotized electric drives on mobile energy equipment and agricultural machinery working bodies. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2018;2(36):41–47.

For citation

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://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>