Национальная академия наук Украины

Институт электродинамики

На правах рукописи

**ТРЕТЯК МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ**

УДК 621.314

**КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

Шидловский Анатолий Корнеевич

д.т.н., проф., академик НАН Украины

Киев – 2013

**СОДЕРЖАНИЕ**

|  |  |
| --- | --- |
| ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ…………………………………… | 5 |
| ВВЕДЕНИЕ……………………………………………………………………….. | 6 |
| **РАЗДЕЛ 1** ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА С КОМБИНИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГОПИТАНИЯ………………………………………… | 12 |
| 1.1 Комбинированные системы энергопитания машин автотранспортного назначения…………………………………………………………………………. | 12 |
| 1.2 Особенности эксплуатационных характеристик тягово-транспортных средств сельскохозяйственного назначения…………………………………….. | 18 |
| 1.3 Повышение эффективности тягово-транспортных средств сельскохозяйственного назначения…………………………………………….. | 21 |
| 1.4 Анализ существующих методов оценки энергетических показателей компонентов систем автономных электротранспортных средств…………….. | 26 |
| Выводы по разделу 1……………………………………………………………. | 31 |
| **РАЗДЕЛ 2** МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНОМ СРЕДСТВЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ…………………………………………………………………… | 33 |
| 2.1 Особенности нагрузочных режимов в тягово-транспортном средстве сельскохозяйственного назначения……………………………………………… | 33 |
| 2.2 Модель механической трансмиссии тягово-транспортного средства сельскохозяйственного назначения…………………………………………….. | 36 |
| 2.3 Универсальная модель электромеханической трансмиссии тягово-транспортного средства сельскохозяйственного назначения…………………... | 41 |
| 2.4 Модель комбинированной системы энергопитания тягово-транспортного средства сельскохозяйственного назначения с электротрансмиссией…..…….. | 60 |
| Выводы по разделу 2..……………………………………………………….……. | 64 |
| **РАЗДЕЛ 3** ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОПИТАНИЯ И ЕЕ КОМПОНЕНТОВ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С/Х НАЗНАЧЕНИЯ…… | 65 |
| 3.1 Развитие метода определения КПД системы энергопитания автономного транспортного средства…………………………………………………………… | 65 |
| 3.1.1 Энергетические показатели системы тягового электрооборудования с широтно-импульсным преобразователем и электрохимическим источником питания (аккумуляторной батареи) в тяговом режиме………………………… | 69 |
| 3.1.2 Определение КПД комбинированной системы энергопитания с дизель-генератором……………………………………………………………………….. | 74 |
| 3.2 Анализ зависимостей энергетических показателей в системе генратор-аккумуляторная батарея-импульсный преобразователь-двигатель постоянного тока от параметров управления преобразователем…………...….. | 75 |
| 3.3 Метод определения основных энергетических параметров компонентов комбинированной системы энергопитания……………………………………… | 78 |
| 3.4 Обоснование применения тягово-транспортных средств с комбинированной системой энергопитания в закрытых помещениях сельскохозяйственного назначения……………………………………………… | 82 |
| 3.5 Разработка методики определения энергетических параметров компонентов бустерного источника энергопитания……………………………. | 86 |
| 3.6 Суперконденсатоы в системах энергопитания транспортных средств …... | 88 |
| Выводы по разделу 3……………..……………………………………………….. | 94 |
| **РАЗДЕЛ 4** ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ЭНЕРГОПИТАНИЯ………………………………………………………………. | 95 |
| 4.1 Структурная схема экспериментального трактора с комбинированной системой энергоснабжения………………………………………………………. | 95 |
| 4.2 Разработка полупроводниковых компонентов электрооборудования и системы электропитания трактора………………………………………………. | 98 |
| 4.2.1 Силовой преобразователь…………………………………………………... | 98 |
| 4.2.2 Система управления силовым преобразователем………………………… | 100 |
| 4.2.3 Проведение экспериментальных исследований силовых и вспомогательных компонентов бортового электрооборудования транспортного средства…………………………………………………………… | 103 |
| 4.2.4 Экспериментальные исследования силовых и вспомогательных компонентов бортового электрооборудования транспортного средства……… | 105 |
| 4.3 Разработка системы мониторинга и регистрации сигналов………………... | 110 |
| 4.4 Проведение испытаний электромеханической и гибридной систем энергопитания трактора…………………………………………………………... | 114 |
| Выводы по разделу 4………………..…………………………………………….. | 118 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ……………………………………………………………….…… | 119 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАНЫХ ИСТОЧНИКОВ………………………….……. | 122 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Расчет параметров модели машины постоянного тока…… | 133 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчет параметров модели синхронной машины…...…...… | 134 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Расчет параметров модели асинхронной машины……..….. | 135 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акты внедрения результатов работы…………..…...……… | 137 |

**ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АБ – аккумуляторная батарея;

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;

Г – генератор;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ДПТ – двигатель постоянного тока;

ЗУ – зарядное устройство;

ИП – импульсный преобразователь;

КПД – коэффициент полезного действия;

КПП – коробка переключения передач;

КЭУ – комбинированные энергоустановки;

МВЭ – металловоздушный элемент;

МТА – машинно-тракторный агрегат;

ПП – полупроводниковый преобразователь;

СК – суперконденсаторы;

с/х – сельское хозяйство;

ТС – транспортное средство;

ТТС – тягово-транспортное средство;

ТЭ – топливные элементы;

ТЭД – тяговый электродвигатель;

Ш-И – широтно-импульсный;

ЭДС – электродвижущая сила;

ЭМ – электромобиль.

**ВВЕДЕНИЕ**

Экономический потенциал страны, развитие ряда отраслей экономики, повышение технологического уровня предприятий в значительной мере обусловлены уровнем развития транспортной отрасли.

Очевидным также является факт тесной взаимосвязи транспортных проблем с проблемами общей и локальной экологии, необходимостью повышения эффективности производства и экономного потребления тепловой и электрической энергии. Эти проблемы для Украины имеют чрезвычайно важное значение, учитывая отсутствие достаточных объемов собственных энергоносителей и глобальное ухудшение экологического состояния окружающей среды.

Отметим, что в настоящее время создание гибридных транспортных средств и широкое их внедрение в мировой практике приобретает все большее значение. Наряду с разработкой новых источников первичной энергии (аккумуляторных батарей и электрохимических генераторов) большое внимание уделяется повышению эффективности всей системы энергопитания, включая бортовой источник энергии, электропривод и ряд вспомогательных устройств. Исследование таких систем с учетом различных особенностей, характеристик и параметров отдельных компонентов системы, нагрузочных режимов и способов управления является сложной теоретической проблемой, которая на данный момент не имеет полного решения. В то же время высокий уровень требований, которые предъявляются к создаваемым новым системам энергопитания гибридных транспортных средств, обуславливает необходимость оптимальной технической реализации этих систем и требует глубокого анализа электромагнитных процессов в системе, исследования ее энергетической эффективности, с целью минимизации затрат энергии, еще на стадии разработки. В полной мере это относится и к электротранспортным средствам сельскохозяйственного назначения, которые сегодня находят все более широкое применение.

**Актуальность темы.** На сегодняшний день достаточно широко применяются гибридные системы энергоснабжения транспортных средств, которые можно рассматривать как переходной этап перед чистым электроприводом. Исследованиями и разработками в этой сфере занимается ряд научных организаций и фирм, например, Mitsubishi, Toyota, General Мotors и другие. Такая работа в данной области проводится и в странах СНГ, в частности длительное время разработкой гибридных систем занимаются в Институте электродинамики НАН Украины.

Применение гибридных трансмиссий дает два положительных эффекта – это повышение экономичности транспортного средства и понижение производимых им вредных выбросов в атмосферу. Поэтому в мире развивается достаточно широкий спектр гибридных транспортных средств – автомобилей, электробусов, грузовых транспортных платформ, многоцелевых платформ военного назначения. Топливная экономия и экологичность так же важны и для сельскохозяйственных машин, являющихся основным энергетическим средством при обработке почвы. Вопрос внедрения электротрансмиссий в сельхозмашинах рассматривался такими известными производителями техники, как Fendt (Германия) и Atlas (Австрия). В СНГ компания «Русэлпром» совместно с Минским тракторным заводом выпустили перспективный трактор «Беларус» с электромеханической трансмиссией. В своих исследованиях они отмечают, что применение электротрансмиссии на сельскохозяйственных тягово-транспортных средствах позволяет:

– стабилизировать работу ДВС в режиме минимального удельного расхода топлива;

– уменьшить буксование движителя при почвообрабатывающих работах;

– упростить управление трансмиссией, исключив многоступенчатую КПП;

– повысить общую эргономику управления МТА;

– существенно(до 30%)снизить потребление топлива.

Однако 30% – это суммарная экономия от человеческого и энергетического факторов. Для повышения эффективности электротрансмиссии актуальным вопросом является количественное представление экономичности, связанной со стабилизацией работы ДВС. Для его исследования необходимо рассмотреть особенности движения МТА.

Рассматривая режимы движения трактора, следует отметить значительные отличия их от режимов движения автомобиля (электромобиля). Это обусловлено разными нагрузками сопротивления движению транспортных средств и соответственно разными характеристиками потребляемой мощности. Надо отметить, что в то время, как у автомобиля существенные затраты энергии приходятся на стоп-стартные режимы, которые при городском цикле движения наиболее свойственны электромобилям, технологический цикл движения сельскохозяйственных машин требует постоянной средней загрузки двигателя с резкими периодическими всплесками до максимальной мощности на протяжении всего движения, то есть с резкопеременными нагрузками. Естественно, что такой характер нагрузки требует иного подхода при создании комбинированной системы энергоснабжения с/х машин по сравнению с автомобильным транспортом.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Исследования по теме диссертационной работы проводились в Институте электродинамики НАН Украины согласно планов НИС НАН Украины по темам: «Параметр-3» (утверждено постановлением Бюро ВФТПЭ НАН Украины от 23.01.2007г., протокол №1, № ГР 0107U002367) и «Параметр-4» (утверждено постановлением Бюро ВФТПЭ НАН Украины от 27.09.2011г., протокол №12, № ГР 0111U009253). При выполнении этих работ автор был ответственным исполнителем разделов, связанных с разработкой систем энергопитания электротранспортных средств.

**Цель и задачи исследований.** Целью диссертационной работы является повышение эффективности комбинированной системы питания электротранспортного средства сельскохозяйственного назначения за счет установления оптимальных энергетических взаимосвязей между элементами системы при резкопеременных нагрузках и разработки новых алгоритмов управления потоками энергии.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить **следующие задачи:**

1. На основе всестороннего анализа известных результатов относительно систем питания электротранспортных средств сельскохозяйственного назначения

Обосновать использование комбинированной системы энергопитания для машин сельскохозяйственного назначения.

2. Разработать обобщающие имитационные модели электротрансмиссии и гибридного транспортного средства с учетом резкопеременных нагрузок сопротивления движению почвообрабатывающего комплекса и провести сравнительный анализ эффективности различных применяемых силовых компонентов.

3. Разработать метод определения коэффициента полезного действия гибридной системы питания транспортного средства.

4. Разработать метод определения параметров гибридной системы энергопитания транспортного средства сельскохозяйственного назначения.

5. Провести экспериментальные исследования на макетном образце электротранспортного средства сельскохозяйственного назначения с комбинированной системой питания с применением созданного для этой цели комплекса мониторинга и регистрации электромагнитных, механических и тепловых процессов в гибридной системе энергоснабжения.

*Объектом исследования*является комбинированная система энергопитания автономного электротранспортного средства с электрохимическим накопителем и дизель-генератором.

*Предмет исследования* **–** режимы работы электротехнического комплекса питания электротранспортного средства сельскохозяйственного назначения при выполнении технологических почвообрабатывающих операций с резкопеременными нагрузками для повышения его энергоэффективности.

**Методы исследований.** При решении поставленных в работе задач применялись: теория дифференциальных уравнений и методы математической физики, теория электрических цепей, математическое моделирование, базирующееся на программных продуктах Matlab-Simulink.

**Научная новизна полученных результатов:**

1. Разработана новая обобщающая модель электромеханической трансмиссии, учитывающая электродинамические процессы, которые протекают при резкопеременных нагрузках в системе энергопитания транспортного средства сельскохозяйственного назначения.

2. Впервые установлено, что из общей экономии топлива в электромеханической трансмиссии третья часть приходится на оптимизированную организацию работы двигателя внутреннего сгорания и применение бесступенчатой передачи.

3. Получил развитие метод определения КПД автономной системы энергопитания, включающей в себя помимо аккумуляторной батареи, преобразователя и тягового электродвигателя еще и двигатель внутреннего сгорания с генератором постоянного тока.

4. Впервые установлены оптимальные диапазоны регулирования потоков энергии от аккумуляторной батареи и генератора в комбинированных системах энергоснабжения транспортных средств.

5. Разработан и обоснован новый метод определения основных параметров компонентов комбинированной системы энергопитания, основывающийся на анализе особенностей сельскохозяйственных технологических операций.

**Практическое значение полученных результатов:**

– показана возможность практического использования емкостных накопителей энергии на транспортных средствах сельскохозяйственного назначения с подзарядом во время выполнения технологических операций, что позволяет повысить экономию органического топлива;

– разработана методика расчета пробега электротранспортного средства с применением бустерной установки, позволяющая формировать требования к ДВС еще на этапе проектирования;

– разработана система стабилизации скорости движения электротранспортного средства, применение которой повышает качество выполнения с/х технологических операций и снижает нагрузку на оператора;

– разработана система мониторинга и регистрации электромагнитных, механических и тепловых параметров автономного электротранспортного средства, позволяющая проводить измерения во время выполнения технологических операций;

– разработаны рекомендации по энергоэффективному использованию электрохимических накопителей энергии при создании автономных электротранспортных средств сельскохозяйственного назначения;

– результаты исследований были опробованы на макетном образце трактора с комбинированной силовой установкой, построенного на базе самоходного шасси Т-16, который проходил испытания в ННЦ «ИМЭСХ».

**Личный вклад соискателя.** Основные положения и результаты, которые выносятся на защиту, принадлежат автору лично.

В печатных работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит: в [1, 3] – обоснование актуальности применения комбинированных систем энергопитания в сельскохозяйственной технике; в [2, 5] – определение элементной базы преобразователей; в [4] – алгоритмы управления потоками энергии; в [6] – анализ различных систем привода; в [7] – определение рациональных эксплуатационных режимов работы в электротранспорта; в [8] – анализ результатов моделирования; [9] – модели трансмиссий.

**Апробация результатов диссертации.** Основные теоретические положения и результаты диссертации докладывались и получили положительную оценку на: 18-й международной научно-технической конференции «Силова електроніка та енергоефективність» (г. Алушта, 2012 г.); международной научно-технической конференции «Проблеми сучасної електротехніки» (г. Винница, 2012 г.); 11-й международной научно-практической конференции «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва» (Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко, г. Харьков, 2012 г.); 20-й международной научно-технической конференции «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства», пгт. Глеваха, 2012 г.); научно-технических семинарах НАН «Преобразовательные приборы для стабилизации параметров электроэнергии» по комплексной проблеме «Научные основы электроэнергетики», проведенных в ИЭД НАН Украины.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 статей в научных профильных журналах и сборниках трудов, и получено авторское свидетельство.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе на основании полученных результатов решена актуальная научная задача повышения эффективности комбинированной системы питания электротранспортного средства сельскохозяйственного назначения за счет установления оптимальных энергетических взаимосвязей между элементами системыпри резкопеременных нагрузках и разработки новых алгоритмов управления потоками энергии.

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. На основе проведенного анализа методов повышения эффективности систем энергопитания электротранспортных средств сельскохозяйственного назначения при работе с резкопеременными нагрузками обоснована целесообразность применения электромеханической трансмиссии с накопителем энергии и разработки новых алгоритмов управления, обеспечивающих максимально возможный КПД системы.
2. Исследованы энергетические взаимосвязи компонентов силового энергооборудования при резкопеременных нагрузках в комбинированной системе энергопитания электротранспортного средства сельскохозяйственного назначения, на основании которых были построены модели механической, электромеханической и гибридной трансмиссий.
3. Разработанная новая обобщающая модель электромеханической трансмиссии дала возможность учитывать различные нагрузочные режимы МТА для широкого ряда компонентов (электродвигателей, генераторов и преобразовательных устройств), что позволило ко проанализировать характер динамических процессов в системе и установить тенденцию сокращения потребления топлива только за счет стабилизации оборотов ДВС.
4. Установлено, что оптимальным диапазоном регулирования потоков энергии от АБ и генератора с точки зрения максимального КПД системы в целом является: для – АБ γ = 0…0,4 (γ – коэффициент заполнения импульсов управления), для генератора – γ = 0,6…1.
5. На основании проведенного анализа колебательных процессов, возникающих при движении почвообрабатывающего комплекса, предложен метод заряда накопителя энергии, который осуществляется в комбинированной системе энергопитания непосредственно на протяжении всего периода выполнения технологических операций.
6. Разработан метод расчета параметров силовых компонентов комбинированной системы энергопитания, учитывающий резкопеременные нагрузки сопротивления движению транспортного средства сельскохозяйственного назначения, который позволяет определять энергетические показатели компонентов еще на этапе проектирования.
7. Предложеная методика определения энергетических параметров компонентов бустерного источника энергопитания электротранспортного средства с учетом возможности его применения в закрытых помещениях сельскохозяйственного назначения, позволяет разработать рекомендации по применению такого рода ТС в сельском хозяйстве.
8. Исследования возможностей применения суперконденсаторов в автономном электротранспорте показали, что непосредственное параллельное соединение основного источника питания и суперконденсатора не всегда дает положительный результат и требует разнесения во времени процессов разряда аккумуляторной батареи и разряда суперконденсатора, что требует дополнительных полупроводниковых устройств.
9. Построен и исследован макетный образец транспортного средства сельскохозяйственного назначения с комбинированной системой энергопитания, для которого разработаны системы стабилизации выходного напряжения генератора и стабилизации скорости движения, а также система управления тяговым электродвигателем.
10. Разработана система мониторинга и регистрации электромагнитных, механических и тепловых параметров автономного электротранспортного средства, позволяющая проводить их измерение в реальном времени (во время выполнения технологических операций).
11. Достоверность и обоснованность теоретических положений, выводов и рекомендаций подтверждена результатами компьютерного моделирования и экспериментальными исследованиями. Полученные результаты нашли практическое применение при разработке современных трансмиссий и перспективных сельскохозяйственных тракторов на ПАО «Харьковский тракторный завод им. С.Орджоникидзе» и в ННЦ «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства» при разработке тракторов с электрическим приводом.

Результаты работы рекомендованы для дальнейшего внедрения на предприятиях машиностроительного профиля Министерства промышленной политики Украины.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Аликин Р.И. Экспериментальное определение доба­вочных пульсационных потерь и КПД тяговых электродвигателей пульсирующего тока / Аликин Р.И., Захаров А.Г.// Сб.науч.тр. Всесоюзного научного проектно-конструкторского и технологического ин-та электровозостроения. – 1977. – Вып. 17. – С. 84 – 91.

2. Алферов В.Г. Система управления двигателем посто­янного тока на микропроцессоре / Алферов В.Г., Жулев В.В. // Тр. Моск. энерг. ин-та. – 1981. – № 520. – С. 60 – 67.

3. Бедфод Б. Теория автономных инверторов / Бедфод Б., Хофт Р. – М.: Энергия, 1969. – 280 с.

4. Бирзниекс Л.В. Импульсные преобразователи постоянного тока / Бирзниекс Л.В. – М.: Энергия, 1974. – 256 с.

5. Валдырев А.С. О времени разгона и торможения электропривода постоянного тока при двухзонном регулировании / Валдырев А.С., Троицкий А.Е. // Автоматизированный электропривод. – 1978. – № 2. – С.73 – 76.

6. Волков И.В. Концепция и средства контроля емкости аккумуляторных батарей / Волков И.В., Павлов В.Б., Скиданов В.М., Юрченко О.Н. // Техн. електродинаміка. – 1998. – № 3. – С.33 – 36.

7. Гладышев С.П. Динамика дискретно-управляемых полупроводниковых преобразователей / Гладышев С.П., Павлов В.Б. – К.: Наук. думка, 1983. – 223 с.

8. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электро­приводах постоянного тока / Глазенко Т.А. – Л.: Энергия, 1973. – 304 с.

9. Глазенко Т.А. Оптимизация алгоритмов уп­равления тиристорными преобразователями в системах электро­привода / Глазенко Т.А., Герман-Галкин С.Г. // Полупроводников. преобразователи современных систем электропривода пром. установок и приборных комплексов: ма­териалы краткосрочного семинара, (Ленинград, 16-17 ноября 1982 г.). Л., 1982. – С.43 – 47.

10. Гурьянов Д.И. Рациональные характеристики электромобиля / Гурьянов Д.И., Луценко В.Н., Гурьянов А.Н., Карпов Д.А., Нгуен Куанг Тхиеу. // Машиностроитель. – 1999. – № 10. – С. 15 – 18.

11. Диланян Э.М. Математи­ческая модель системы "аккумуляторная батарея-импульсный пре­образователь-двигатель постоянного тока" / Диланян Э.М., Вариэтян В.С., Моццэлян А.А. // Изв. АН Арм. ССР. Серия Техн. науки. – 1978. – 31, №3 – С.16 – 23.

12. Доржинкевич И.Б. Особенности проектирования электрооборудо­вания электромобиля / Доржинкевич И.Б. // Электротехника. – 1981 – № 10 – С.19 – 23.

13. Ефремов И.С. Перспективы применения микроэлектроники в сис­темах управления преобразовательными устройствами электро­тяги / Ефремов И.С. // Тр. Моск. энерг. ин-та. – 1979. – № 421. – С.3 – 10.

14. Ефремов И.С. Тиристорно-импульсная система уп­равления электромобилей с двигателем постоянного тока / Ефремов И.С. Кузнецов А.Н. // Элек­тричество. – 1978. – № 2. – С.38 – 47.

15. Зиновьев Г.С. Оптимизация алгоритмов управления вентильными преобразователями по энергетическим критериям / Зиновьев Г.С. // Преобразова­тельная техника. – 1979. – С.166 – 172.

16. Костенко М.П. Электрические машины / Костенко М.П., Питровский Л.М. – М.: Энергия, 1964. – Ч.1. – 554 с.

17. Миллер Е.В. Об определении оптимального передаточного числа электромобиля / Миллер Е.В. // Электропривод и автоматиз. в машиностроении 1979. – с. 70 – 75.

18. Мхитарян Н.М. Система приводу гібридного електромобіля / Мхитарян Н.М., Кудря С.А., Павлов В.Б., Попов О.В. // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – К.: ІЕД НАН України, 2006. – №3. – С. 57 – 65.

19. Павлов В.Б. Міський електромобіль в Україні / Павлов В.Б., Попов О.В., Павленко В.Є., Тугаєнко Ю.П., Третяк М.В. // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». − 2011. − Ч 1. − С.127 – 131.

20. Павлов В.Б. Электротранспорт с автономными источниками питания (актуальность, состояние, перспектива) / Павлов В.Б., Попов А.В. // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – К.: ІЕД НАН України, 2007. – №1(16). – Ч.2. – С. 57 – 65.

21. Пат. № 67991, Україна, МПК(2012) НО2Р 7/00. Пристрій регулювання, синхронізації та стабілізації швидкості обертання мотор-коліс електротранспортного засобу / Павлов В.Б., Попов О.В., Третяк М.В.; заявник та патентоутримувач – Інститут електродинаміки НАН України (UA); заявл. 22.08.2011; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5.

22. Павлов В.Б. Низковольтный импульсный транзисторный преобразователь / Павлов В.Б., Рычков В.А., Юрченко О.Н. // Техн. электродинамика. – 1993. – № 4. – С.27–31.

23. Павлов В.Б. Энергетические показатели системы аккумуляторная батарея – широтно-импульсный преобразователь-двигатель постоянного тока электромобиля в тяговом режиме / Павлов В.Б., Скиданов В.М. // Техн. электродинамика. – 1983. – № 6 – С.61 – 69.

24. Павлов В.Б. Энергетические показатели системы АБ-ШИП-ДПТ электромобиля в тяговом режиме / Павлов В.Б., Скиданов В.М. // Техн. электродинамика. – 1983. – № 6. – С. 61 – 69.