

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

УДК 629.114.4/5-83

На правах рукописи

ЯКОВЛЕВ Анатолий Иванович

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА
МОТОР-КОЛЕС АВТОМОБИЛЕЙ

Специальности: 05.05.03 - автомобили и тракторы,
05.22.07 - подвижной состав и
тяга поездов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва, 1984

Работа выполнена в Центральном ордена Трудового
Красного Знамени научно-исследовательском автомобильном
и автомоторном институте (НАМИ)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Смирнов Г.А.

доктор технических наук, профессор Тулупов В.Д.

доктор технических наук, профессор Аксенов П.В.

Ведущее предприятие - Отдел главного конструктора
автомобильного завода им. И.А.Лихачева

Защита диссертации состоится "13" декабря 1984 г.
на заседании специализированного Совета Д.053.15.06
по машиностроению при МВТУ им. Н.Э.Баумана
по адресу: 5

Ваши заверенные
печатью,

С ди ВТУ
им. Н.Э.Б.

Автор 1 г.

Ученый Галашин

Д-83193. афия НАМИ

М421324

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Решениями XXVI съезда КПСС предусмотрено разработать конструкции и освоить выпуск новых карьерных автомобилей-самосвалов большой грузоподъемности, автомобилей и автопоездов высокой проходимости различного назначения и автобусов с улучшенными техническими характеристиками.

Накопленный в автомобилестроении опыт подтверждает наличие перспектив в применении электропривода с мотор-колесами на автомобилях указанных типов. Создано значительное число образцов автомобилей и автопоездов с оригинальными компоновочными и конструктивными решениями, различающихся грузоподъемностью и назначением. В Советском Союзе осуществляется серийный выпуск автомобилей с электроприводом и мотор-колесами.

Перспективы внедрения электропривода на автомобилях в силу ряда предпосылок имеют устойчивый характер. Вместе с тем при создании агрегатов электропривода, в том числе мотор-колес, должен быть достигнут высокий уровень параметров, обеспечивающий технико-экономическую целесообразность их применения на автомобиле. Мотор-колесо является сложным и дорогим агрегатом, причем его конструктивные и функциональные свойства тесно связаны с технико-эксплуатационными характеристиками автомобиля. В случае неполного соответствия параметров мотор-колеса параметрам автомобиля не могут быть реализованы заданные тягово-динамические свойства, возникают ограничения по условиям эксплуатации автомобиля, ухудшается топливная экономичность, снижается надежность агрегата и системы электропривода в целом [20, 31].

Разработанный метод проектирования и расчета мотор-колес автомобилей позволяет решить главную технико-экономическую задачу, возникающую при создании агрегата. Эта задача заключается в выявлении определенных значений параметров мотор-колеса, соответствующих техническим характеристикам и условиям движения автомобиля данного типа и назначения [19, 22, 31]. Этим определяется актуальность диссертационной работы.

Изложенное позволяет считать разработку метода проектирования и расчета мотор-колес автомобилей серьезной научной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Детальная проработка различных аспектов этой проблемы проводится в НАМИ, начиная с 1962 г. Наряду с исследованием теорети-



ческих вопросов были разработаны, изготовлены и испытаны образцы мотор-колес для автомобилей различного типа и назначения [14, 20, 21, 27, 29, 30]. Эти работы дали необходимый материал для проверки и уточнения основных положений предложенного метода проектирования и расчета мотор-колес.

Выполненная работа непосредственно связана с фундаментальными трудами в области теории автомобиля, электрической тяги, теплорелектрического привода, планетарных передач, динамических процессов в многомассовых крутильных системах, в области изучения условий движения автомобилей. Авторами этих трудов являются видные советские ученые: П.В.Аксенов, И.М.Бабаков, В.Ф.Бабков, Г.В.Безбродова, Н.Ф.Бочаров, И.С.Ефремов, П.Н.Иванченко, И.П.Исаев, В.И.Ключев, М.А.Крейнес, В.Н.Кудрявцев, А.С.Литвинов, В.В.Осепчугов, А.Н.Островцов, Н.А.Погарский, В.Н.Прокофьев, Д.Н.Решетов, В.Е.Розенфельд, Н.А.Ротанов, В.М.Семенов, З.Л.Сироткин, Г.А.Смирнов, А.Д.Степанов, В.П.Терских, В.Д.Тулупов, В.С.Фалькевич, Я.Е.Фарбин, А.К.Фрумкин, И.С.Цитович.

Значительный вклад в создание различных образцов мотор-колес внесли руководители конструкторских коллективов З.Л.Сироткин, А.В.Зотов, В.А.Грачев, С.Г.Вольский, В.Б.Лаврентьев, И.И.Сальников, А.В.Титов, В.И.Сливинский, А.В.Чанков, ученые и конструкторы М.П.Афиногенов, Н.Ф.Бочаров, Ю.В.Буралев, В.Г.Визорнов, Б.П.Гущо-Малков, Г.С.Звездина, Н.И.Зубарев, С.И.Каган, П.И.Мохов, Н.М.Никонов, Р.Н.Парашенко, С.Ф.Румянцев, В.В.Шестопалов.

Различные образцы мотор-колес автомобилей и автопоездов изготавливались рядом предприятий и институтов: Белорусским автомобильным заводом, Автомобильным заводом им.И.А.Лихачева, ВКЭИ автобусапром, МВТУ им.Н.Э.Баумана, НАМИ и др.

Цель работы. Создание метода проектирования и расчета мотор-колес с рациональными параметрами для автомобилей определенного типа и назначения на базе выявления существенных связей между параметрами мотор-колеса и техническими свойствами автомобиля, а также условиями его эксплуатации.

Научная новизна. В реферируемой работе впервые исследованы общие свойства мотор-колеса как самостоятельного объекта изучения.

Характерной особенностью мотор-колеса является универсальность, которая заключается в возможности его применения на автомобилях и автопоездах определенного назначения, различающихся грузоподъемностью, колесной формулой или числом звеньев. Это свойство мотор-колеса позволяет при определенных условиях исследовать

его независимо от других элементов электропривода.

Важной составной частью исследуемой проблемы является выявление зависимостей выделенных параметров мотор-колеса от параметров автомобиля. Впервые получено математическое описание связей между этими группами параметров, особенностью которого является учет уровня нагрузки электродвигателя мотор-колеса, применяемого на автомобиле данного типа и назначения. Введение соответствующего параметра основано на использовании статистических факторов, характеризующих условия движения и режим ведения автомобиля.

Впервые разработана общая математическая модель системы "тепловой двигатель - генератор - мотор-колеса - автомобиль", используемая при исследовании динамики электромеханических систем этого класса. Выполнен анализ динамических процессов в подсистеме мотор-колеса. Наибольшую опасность для подсистемы мотор-колеса представляет установившийся резонанс крутильных колебаний. Обоснована необходимость прогнозирования зон резонанса, методика которого включает определение собственных частот подсистемы.

Рассмотрены технические аспекты унификации мотор-колес и их электродвигателей. Предложены методы сокращения числа типоразмеров электродвигателей при разработке типоразмерных рядов мотор-колес на базе шин одного конструктивного типа и шин различных типов.

Для расширения и углубления изучения свойств мотор-колеса определен объем и разработаны методы типовых экспериментальных исследований мотор-колес. Эти рекомендации базируются на обобщении результатов значительного числа стендовых и частично ходовых испытаний опытных образцов мотор-колес.

Предложенный метод проектирования и расчета мотор-колес является универсальным, т.е. он применим к мотор-колесам автомобилей любого типа и назначения.

На защиту выносятся метод проектирования и расчета мотор-колес автомобилей, разработанный на основе созданной теории, включающей исследование уровня нагрузки электродвигателей, установление связей между параметрами автомобиля и мотор-колеса, изучение динамики системы "тепловой двигатель - генератор - мотор-колеса - автомобиль" и подсистемы мотор-колеса, а также на основе результатов типовых экспериментальных исследований мотор-колес.

Практическая ценность и реализация работы. Предложенный метод проектирования и расчета мотор-колес внедрен при создании новой

автомобильной техники на Белорусском автомобильном заводе, в конструкторском бюро автомобильного завода им. И.А.Лихачева, во Всесоюзном конструкторско-экспериментальном институте автобусостроения, при создании систем электропривода автомобилей-самосвалов БелАЗ во Всесоюзном научно-исследовательском и проектно-технологическом институте производственного объединения "Динамо", при выполнении экспортного контракта на создание мотор-колес для автопоезда по заказу предприятия ЧССР через Всесоюзное объединение "Внештехника".

Созданный метод использован при выполнении работ по планам НИР Минавтопрома, предусматривавшим разработку и изготовление НАМИ совместно с институтами ВКЭИ автобуспром и ВУЭС (Исследовательский и проектный институт электрических машин, г.Брно, ЧССР), Белорусским и Могилевским автозаводами ряда образцов автомобилей и автопоездов с электроприводом и мотор-колесами. Технические свойства этих мотор-колес были исследованы на стенде НАМИ и при ходовых испытаниях автомобилей.

Из числа созданных образцов следует отметить мотор-колесо периодического действия с асинхронным двигателем для двухзвенного автопоезда типа 4x4, удостоенное серебряной медали ВДНХ, и мотор-колесо для автобуса типа 6x4, отмеченное золотой медалью и дипломом на XX Международной ярмарке в г.Брно (ЧССР).

Разработанный метод проектирования и расчета мотор-колес автомобилей опубликован автором в монографиях и ряде статей.

Ряд положений реферируемой работы представляет собой основу для выполнения дальнейших самостоятельных исследований, связанных с системой тягового электропривода или мотор-колесом.

Разработанный метод исследования уровня нагрузки электродвигателя мотор-колеса в принципе применим к тяговым электродвигателям любого транспортного средства с электроприводом. Выявление уровня нагрузки тягового электродвигателя с учетом всех существенных эксплуатационных факторов, характерных для данного транспортного средства, позволяет оценить степень напряженности рабочих режимов электродвигателя, что имеет большое практическое значение.

Создание математической модели системы "тепловой двигатель - генератор - мотор-колесо - автомобиль" открывает возможности для исследования различных видов динамических процессов в этой системе.

Полученное математическое описание связей между параметрами мотор-колеса и определенными параметрами автомобиля представляет собой необходимую предпосылку для выполнения работ по унификации мотор-колес. Задачи по унификации мотор-колес и их элементов возникают одновременно с началом их мелкосерийного производства. Рекомендации данной работы использованы при решении задач по унификации мотор-колес и их электродвигателей на заводе БеАЗ и в институте ВНИПИ ПО "Динамо".

Предложенный в данной работе метод типовых экспериментальных исследований мотор-колес позволял при минимальном объеме работ и с наименьшими затратами дать надежную оценку ряда свойств опытных образцов мотор-колес, которые были учтены в дальнейших разработках.

Апробация работы. Результаты работы докладывались в институте ВКЭИавтобустром (1970г), на Белорусском автомобильном заводе (1973г), на Могилевском автомобильном заводе (1968г), на автомобильном заводе им. И.А. Дикачева (1972г), на юбилейном пленуме научно-технического совета НАМИ (1968г), в институте повышения квалификации руководящих кадров Минавтопрома (1973-74 г.г.), в ИВТУ (1983г.), на конференции по автоматическим трансмиссиям автомобилей в НАМИ (1966г).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 монографий и 18 статей, получено 7 авторских свидетельств.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 13 разделов, включая введение, общие выводы и приложения. Объем диссертации 438 с.: 291 с. основного текста, 39 с. иллюстраций, приложения на 91 с. Список использованной литературы на 11 с. содержит 110 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Общие положения

Мотор-колесо является исполнительным механизмом системы электропривода автомобиля. Оно включает следующие элементы: тяговый электродвигатель, механическую передачу, колесо, опорные подшипники колеса, механический тормоз, уплотнения полостей редуктора и агрегата, элементы механизмов подвески и поворота. Объединение тягового электродвигателя и колесного движителя в

одном агрегате является особенностью привода этого вида.

В зависимости от режима работы электропривода с мотор-колесами последние делят на мотор-колеса постоянного действия (односкоростные и двухскоростные) и мотор-колеса периодического действия [13, 20].

Существует ряд предпосылок применения электропривода с мотор-колесами на автомобилях и автопоездах вместо гидромеханического привода ведущих колес: рациональное дробление и передача мощности от силовой установки к ведущим колесам и использование бесступенчатых систем привода с автоматическим регулированием его рабочих режимов; возможность создания автотранспортных средств высокой проходимости или большой грузоподъемности, для которых электропривод с мотор-колесами является наиболее целесообразным видом привода; снижение полной массы агрегатов электропривода по сравнению с массой агрегатов гидромеханического привода при мощности первичного двигателя 600–800 кВт и более; повышенная надежность и долговечность, пониженная трудоемкость обслуживания и ремонта агрегатов электропривода. На многoprиводных автотранспортных средствах и автомобилях особо большой грузоподъемности применение электропривода обеспечивает приемлемый расход топлива тепловым двигателем [32].

С точки зрения сокращения сроков внедрения электропривода с мотор-колесами наиболее перспективны большегрузные автомобили-самосвалы, полноприводные автомобили высокой проходимости и городские автобусы большой вместимости.

Преимущества, которые достигаются при использовании на автомобилях трех указанных групп электропривода с мотор-колесами, заключаются в следующем:

автомобили-самосвалы

- в возможности реализации одним колесом большой мощности, что позволяет повышать грузоподъемность автомобиля-самосвала без увеличения числа ведущих колес;

- в улучшении компоновки автомобиля за счет достаточно свободного выбора места установки мотор-колес относительно других элементов автомобиля;

- в получении желаемого распределения массы автомобиля по осям вследствие возможности варьировать базой автомобиля;

- в сокращении числа деталей и узлов механической передачи, подверженных интенсивному износу в эксплуатации, что порождает на-

дежность и долговечность системы привода в целом;

- в высокой эффективности и надежности торможения на затяжных уклонах большой величины за счет использования электрического тормоза;

автомобили (автопоезда) высокой проходимости

- в свободном выборе колесной формулы и числа звеньев автомобиля (автопоезда);

- в возможности создания автомобилей (автопоездов) практически с любым числом ведущих осей, что недостижимо при приводе других видов;

- в существенном увеличении полной массы автомобиля (автопоезда) без увеличения лимитированной нагрузки на ось;

- в свободной компоновке шасси, что позволяет достигнуть большой степени соответствия конструкции шасси характеристикам перевозимого груза;

- в простоте механической части электропривода автомобилей типа 8х8 по сравнению с агрегатами гидромеханического привода, уменьшении числа подверженных износу деталей привода и тем самым в повышении его надежности и долговечности;

- в существенном повышении проходимости автомобиля (автопоезда) по ряду причин: за счет увеличения числа ведущих осей; благодаря плавному нарастанию силы тяги на колесах; вследствие отсутствия дифференциального эффекта между осями и колесами и возможности введения в схему электропривода специального противобуксовочного устройства для каждого мотор-колеса;

- в улучшении общего КПД привода на многоосных полноприводных машинах за счет снижения потерь в шинах по сравнению с вариантом, когда та же мощность реализуется при меньшем числе ведущих колес;

- в обеспечении заданного диапазона силы тяги при бесступенчатом или двухступенчатом регулировании;

городские автобусы

- в возможности создания автобусов большой и особо большой вместимости с высокими тягово-сцепными показателями, например, автобусов длиной 12 м с колесной формулой 6х4, сочлененных автобусов длиной 14-19 м с колесной формулой 6х4 или 8х4, причем масса агрегатов электропривода при указанных колесных формулах будет умеренной;

- в существенном улучшении планировки пассажирского салона,

в первую очередь благодаря расширению прохода в зоне задних колес за счет отказа от применения двоянных шин при колесной формуле 6×4 или 8×4 ;

- в возможности значительного снижения уровня пола вплоть до 360 мм от поверхности дороги и уменьшения числа ступеней в дверях пассажирского салона, что улучшит условия входа и выхода пассажиров, сократит время стоянки на остановках и повысит эксплуатационную скорость автобуса;

- в повышении безопасности движения автобуса за счет введения электрического торможения, действующего независимо от механического тормоза;

- в повышении производительности автобуса за счет увеличения вместимости и повышения эксплуатационной скорости;

- в повышении комфортабельности автобуса за счет указанных конструктивных мероприятий, а также плавного изменения ускорения при разгоне и торможении.

В работе рассмотрены мотор-колеса с электродвигателями постоянного тока и асинхронными двигателями, т.е. технически осуществимые варианты при современном развитии автомобилестроения и электротехники.

Наиболее существенные параметры систем электропривода непосредственно зависят от двух физических величин, характеризующих условия движения автомобиля: от коэффициента общего сопротивления движению ψ и от коэффициента сцепления колеса с опорной поверхностью $\varphi_{сц}$ [31].

Распределение величины ψ наряду с параметрами, характеризующими динамику движения автомобиля, определяет нагрузочные режимы системы электропривода и, следовательно, мощностные, габаритные и в значительной степени конструктивные параметры мотор-колеса. При исследовании параметров мотор-колеса, связанных с величиной ψ , его можно выделить из системы электропривода и рассматривать как отдельный агрегат.

Процессы, обусловленные изменением значения $\varphi_{сц}$, зависят от параметров каждого элемента электропривода и от сочетания этих параметров. Поэтому свойства электропривода, связанные с изменением коэффициента $\varphi_{сц}$, характеризуют систему в целом.

Исследование уровня нагрузки электродвигателей мотор-колес

Уровень нагрузки электродвигателей мотор-колес непосредственно связан с типом и назначением автомобиля и определяется

условиями движения, характеризующимися видом опорной поверхности и профилем трассы, и режимом ведения автомобиля, зависящим от условий движения, дорожной ситуации и действий водителя.

Условия движения и режим ведения автомобиля с электроприводом зависят от ряда случайных эксплуатационных факторов, вследствие чего их анализ возможен лишь на основе методов математической статистики. Наиболее объективным параметром оценки уровня нагрузки электродвигателя мотор-колеса является среднее эксплуатационное значение удельной силы тяги $f_{\text{экс}}$, которое характеризует уровень нагрузки электродвигателя мотор-колеса за период времени, соответствующий расчетному пробегу автомобиля [32].

Основным исходным фактором при определении $f_{\text{экс}}$ является ряд распределения непрерывной случайной величины ψ . Он характеризует условия движения автомобиля, т.е. те объективные, независящие от водителя причины, которые обуславливают существенную долю нагрузки электродвигателя мотор-колеса. Ряд распределения величины ψ имеет вид

$$\left\{ \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_i, \dots, \psi_k \right\}, \\ \left\{ L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_k \right\},$$

причем частота L_i определенного значения случайной величины ψ_i представляет собой выраженное в промилле отношение суммы участков $\sum \Delta L_i$ расчетного пробега L , характеризующихся значениями ψ_i , к расчетному пробегу L , т.е. $L_i = \sum \Delta L_i / L$.

Поскольку доля нагрузки электродвигателя, обусловленная изменением кинетической энергии автомобиля, непосредственно зависит от длины перегонов, необходимо систематизировать изменение этой величины. Введем параметр относительной длины перегона $\lambda_n = L_n / L$ (L_n - абсолютная длина перегона), который можно рассматривать в качестве непрерывной случайной величины с частотой повторяемости $l = \sum L_n / L$, где $\sum L_n$ - протяженность перегонов данной длины за расчетный пробег. Ряд распределения величины λ_n , являющийся вторым исходным фактором при оценке уровня нагрузки электродвигателей, имеет вид:

$$\left\{ \lambda_{n1}, \lambda_{n2}, \dots, \lambda_{nk}, \dots, \lambda_{nt} \right\}, \\ \left\{ l_1, l_2, \dots, l_k, \dots, l_t \right\}.$$

В метод оценки уровня нагрузки вводят параметр времени, что позволяет совместно рассматривать значение нагрузки и продолжи-

тельность ее действия, и систематизируют такие факторы, как реализуемая на колесе мощность, характер трассы и особенности маршрута, дорожная ситуация, логика действий водителя в данных условиях. Затем методами математической статистики выявляют составляющие удельной эксплуатационной силы тяги и искомую величину, которая для автомобилей трех исследуемых групп соответственно составляет: 0,118; 0,157; 0,093.

Базовые параметры автомобилей с электроприводом

Необходимой составной частью метода расчета параметров мотор-колес автомобилей является выявление зависимостей между базовыми параметрами автомобиля и основными параметрами мотор-колеса. К базовым отнесем параметры, характеризующие конструктивные, энергетические и динамические свойства автомобиля с электроприводом, а также условия его эксплуатации. От базовых параметров автомобиля зависят основные параметры мотор-колеса, характеризующие его свойства как агрегата системы электропривода автомобиля [13, 20].

Базовые параметры автомобиля разделим на основные, характеризующие свойства только автомобиля, и производные, характеризующие свойства как автомобиля, так и системы электропривода. К основным базовым параметрам отнесем следующие: номинальную нагрузку на шину G_K в Н; максимальную скорость V_{max} в км/ч; максимальный динамический фактор D_{max} ; удельную расчетную мощность автомобиля N_e в кВт/кН; среднее эксплуатационное значение удельной силы тяги $f_{экс}$. Производные базовые параметры: коэффициент энерговооруженности мотор-колеса K_A в кВт/кН; коэффициент допустимой перегрузки электродвигателя мотор-колеса K_F ; коэффициенты относительной жесткости механической характеристики электродвигателя постоянного тока χ_1 и χ_2 ; соотношение максимальной и длительной частот асинхронного двигателя f_{1max}/f_{1co} .

Параметры колесного движителя зависят от назначения, колесной формулы и массы автомобиля. Максимальную скорость выбирают с учетом ряда факторов, в том числе свойств электропривода. Анализ технических характеристик автомобилей каждой из трех групп позволяет рекомендовать значения максимального динамического фактора. Значения удельной расчетной мощности также находят путем анализа параметров автомобилей данной группы.

Коэффициент энерговооруженности мотор-колеса равен отношению предельной мощности на колесе к расчетной нагрузке на шину, 10.

т.е. $k_A = P_{\text{к пред}} / (G_k \cdot 10^3)$ кВт/кН. Предельная мощность является функцией нескольких переменных, однако при определении k_A мощность $P_{\text{к пред}}$ можно принять неизменной на всех режимах движения автомобиля. Параметр k_A учитывает расход мощности теплового двигателя на привод вспомогательных агрегатов и КПД элементов электропривода, но не принимает во внимание неактивизированные оси автомобиля.

Коэффициент допустимой перегрузки по моменту $k_F = M_{g \text{ нб}} / M_{g \infty}$, равный отношению наибольшего реализуемого момента электродвигателя и моменту длительного режима, характеризует использование перегрузочной способности электродвигателя в зависимости от условий эксплуатации автомобиля данного назначения. При выявлении целесообразных значений k_F для автомобилей трех групп использованы найденные значения удельной эксплуатационной силы тяги и критерии, характеризующие вероятные значения и длительность действия перегрузок.

Параметры формы механической характеристики электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения, а также смешанного и независимого возбуждения с разомкнутой системой регулирования тока независимой обмотки устанавливают при напряжении длительного режима электродвигателя $U_{g \infty}$.

Параметром формы механической характеристики служит коэффициент относительной жесткости, равный $\chi = (-n_g / M_g) (dM_g / dn_g)$ [17]. Используем два значения этого коэффициента: χ_1 для той части характеристики, которая соответствует перегрузкам по моменту относительно длительного его значения, и χ_2 для части механической характеристики с моментами, меньшими длительного момента. От коэффициента χ_1 зависит степень неравномерности нагрузки электродвигателей и развитие процесса буксования. Рекомендованы значения χ_1 для автомобилей с различной колесной формулой. Коэффициент χ_2 влияет на необходимое значение отношения максимального напряжения на зажимах электродвигателя к напряжению длительного режима, называемое коэффициентом регулирования напряжения $k_U = U_{g \text{ max}} / U_{g \infty}$. Рекомендованы рациональные значения χ_2 .

В тяговом электроприводе переменного тока с использованием в мотор-колесах асинхронных двигателей отношение максимальной и длительной частот асинхронного двигателя приблизительно равно отношению соответствующих частот вращения и скоростей, т.е.

$$\frac{f_{1\max}}{f_{1\infty}} \approx \frac{n_{g\max}}{n_{g\infty}} = \frac{V_{\max}}{V_{\infty}} = k_v,$$

где k_v - коэффициент регулирования скорости. После преобразований найдем

$$k_v = \frac{D_{\max} V_{\max}}{36 k_A k_F}.$$

Для автомобилей трех групп получены зависимости $k_v(k_A)$, справедливые для определенного диапазона значений G_k при условии, что остальные базовые параметры, входящие в формулу, приняты постоянными. Это обстоятельство позволяет отнести величину $f_{1\max}/f_{1\infty} \approx k_v$ к производным базовым параметрам.

Зависимости $k_v(k_A)$ справедливы и для электродвигателей постоянного тока, если понимать под $k_v = V_{\max}/V_{\infty}$.

Главные соотношения между базовыми параметрами автомобиля и основными параметрами мотор-колеса

Основные параметры мотор-колеса включают основные параметры электродвигателя и редуктора. Эти параметры характеризуют наиболее важные функциональные и конструктивные свойства указанных элементов [22,31].

К основным параметрам электродвигателя отнесем: параметры длительного режима (мощность $P_{g\infty}$, момент $M_{g\infty}$, частота вращения $n_{g\infty}$, частота $f_{1\infty}$ - для асинхронных двигателей); коэффициент регулирования напряжения K_v - для электродвигателей постоянного тока; основные размеры (диаметр D_a и длину l_a стального пакета якоря - для электродвигателей постоянного тока, внутренний диаметр D_s и длину l_s стального пакета статора - для асинхронных двигателей); массу электродвигателя G_g .

Основные параметры электродвигателя используют при его проектировании как исходные данные для расчета электромагнитных и конструктивных параметров.

Параметры длительного режима электродвигателя:

$$P_{g\infty} = \frac{G_k k_A}{10^3 \eta_p} \text{ кВт}; \quad M_{g\infty} = \frac{G_k D_{\max} V_{\max}}{0,377 n_{g\max} k_F \eta_p} \text{ Нм};$$

$$n_{g\infty} = \frac{36 n_{g\max} k_A k_F}{D_{\max} V_{\max}} \text{ 1/мин}; \quad f_{1\infty} = \frac{0,06 k_A k_F n_{g\max} P_g}{D_{\max} V_{\max}} \text{ Гц}.$$

Соотношение между базовыми параметрами и коэффициентом регулирования напряжения

$$K_U = V_{нб} / 10^E; \quad E = \left\{ \lg [V_{нб} (3,6 k_A k_F)^{X_2-1} D_{max}^{1-X_2}] \right\} / X_2;$$

$$X_2 = \lg [3,6 k_A k_F / (D_{max} V'_{нб})] / \left\{ \lg 3,6 k_A k_F / (D_{max} V_{нб}) \right\}$$

или $K_U = (k_V / k_F) (V_{\infty} / 10^E)$, причем $k_F = \Phi'_g / \Phi''_g$.

Здесь: p_g - число пар полюсов электродвигателя; η_p - КПД редуктора; $V_{нб}^g$ - наибольшая скорость, реализуемая путем повышения напряжения; $V'_{нб}$ - наибольшая скорость при напряжении $U_{g\infty}$ и силе тяги, соответствующей скорости $V_{нб}$; Φ'_g - магнитный поток до ослабления поля; Φ''_g - магнитный поток после ослабления поля.

Главные размеры электродвигателя постоянного тока связаны соотношением

$$l_a = [0,091 / (\alpha V_{amax} A_{\infty} B_{\delta\infty} D_a)] [G_k D_{max} V_{max} / (k_F \eta_p)].$$

В уравнение, помимо числового коэффициента, входят базовые параметры автомобиля, а также диаметр якоря и величины, непосредственно зависящие от диаметра якоря (коэффициент полюсного перекрытия α , максимальная окружная скорость V_{amax} , линейная нагрузка при длительном токе A_{∞} , индукция в воздушном зазоре $B_{\delta\infty}$ при токе возбуждения длительного режима). Чтобы использовать это уравнение для определения длины якоря, необходимо оценить значение D_a исходя из факторов, непосредственно не связанных с базовыми параметрами, например, вида компоновки мотор-колеса, посадочного диаметра шины и пр.

Главные размеры асинхронного двигателя связаны соотношением

$$l_s = [2,36 k_E / (\eta_{gmax} A_{\infty} B_{\delta\infty} \cos \varphi_{\infty} D_s^2)] [G_k D_{max} V_{max} / (k_F \eta_p \eta_g)].$$

Линейную нагрузку статора A_{∞} и индукцию в воздушном зазоре $B_{\delta\infty}$, соответствующие длительному режиму, принимают в зависимости от полюсного деления τ асинхронного двигателя; значения коэффициента мощности $\cos \varphi_{\infty}$ и коэффициента k_F принимают в соответствии с рекомендациями этой работы; η_g - КПД электродвигателя.

Для выбора соотношения между l_s и D_s получают зависимость $l_s(D_s)$, задаваясь рядом значений D_s . Выбор рационального значения D_s следует увязать с анализом значений отношения

l_s/τ , которое определяет свойства асинхронного двигателя.

При оценке массы электродвигателя постоянного тока и асинхронного двигателя используют формулы

$$G_g = K_G D_a^2 l_a \quad \text{и} \quad G_g = K_G D_s^2 l_s,$$

причем значение коэффициента K_G вычисляют по значениям G_g, D_a и l_a (или G_g, D_s, l_s) для выполненных образцов электродвигателей того конструктивного типа, к которому относится создаваемый электродвигатель.

К основным параметрам редуктора отнесем: передаточное число l_p ; суммарную ширину зубчатых венцов шестерен всех рядов редуктора $\sum_{i=1}^r B_i$; "активный" объем редуктора.

Передаточное число редуктора определяют с использованием максимальных значений скорости или динамического фактора. Во втором случае в формулу

$$l_p = G_k D_{\max} r_k / (M_g \omega k_f \eta_p)$$

вводят коэффициент K_f (r_k - радиус качения ведущего колеса).

При образовании кинематической схемы редуктора односкоростного мотор-колеса используют передачи, составленные из двух или трех планетарных рядов, трехпоточные двухступенчатые и трехступенчатые передачи с двухвенцовыми шестернями в планетарном и планетарном варианте, а также передачу ЗК.

Основная задача при образовании кинематической схемы редуктора состоит в выявлении варианта схемы, отличающегося простотой, высоким КПД, позволяющего создать надежную конструкцию. При этом учитывают ограничения, связанные с реализацией заданного передаточного числа при рекомендуемых ограничениях конструктивного параметра; по КПД редуктора; габаритные ограничения в использовании передач определенных типов; по частоте вращения сателлитов входного ряда; обусловленные особенностями компоновки и конструкции мотор-колеса. Анализ этих факторов позволяет выбрать конкретные передачи для последующего синтеза кинематической схемы редуктора.

Диаметральный размер передач, образующих редуктор, обычно имеет ограничение, обусловленное компоновкой мотор-колеса. С учетом этого условия устанавливают суммарную ширину венцов шестерен всех рядов редуктора, которая существенно влияет на его осевой размер. С учетом известных соотношений предложены формулы для

определения ширины зубцов шестерен каждого ряда редуктора по напряжениям изгиба и по контактным напряжениям, причем в формулы введены базовые параметры автомобиля. Основным параметром редуктора считают минимальное значение $\sum_{i=1}^n B_i(\min)$ функции $\sum_{i=1}^n B_i(k_i)$ для двухрядных редукторов и функции $\sum_{i=1}^n B_i(k_2)$ при $k_1 = k_{1\max}$ для трехрядных редукторов (k_1 и k_2 - конструктивные параметры первого и второго рядов, n - число рядов).

"Активный" объем редуктора определяют как произведение суммарной ширины зубчатых венцов шестерен всех рядов на площадь круга, диаметр которого равен диаметру делительной окружности коронной или венечной шестерни, принятому одинаковым для всех рядов. Он характеризует свойства редуктора мотор-колеса в том случае, когда размеры шины и конструкция мотор-колеса делают целесообразным выбор диаметра делительной окружности коронной (венечной) шестерни b меньше предельного значения по конструктивным соображениям. Зависимость $\pi b \cdot \sum_{i=1}^n B_i(\min) = \varphi(b)$ позволяет оценить количественную сторону изменения "активного" объема при выборе значений параметра b в некотором диапазоне.

Для двухскоростных мотор-колес справедливы соотношения между базовыми параметрами автомобиля и основными параметрами электродвигателя, полученные для односкоростных мотор-колес. Однако в этом случае следует исходить не из максимального динамического фактора, а из максимального динамического фактора на второй передаче $D_{\max II}$ [28, 31].

Введем параметр - коэффициент переключения, равный отношению скорости длительного режима на второй передаче к максимальной скорости на первой передаче; $k_{\text{пер}} = v_{\text{ср II}} / v_{\text{max I}}$, который изменяется в пределах $1 \leq k_{\text{пер}} \leq k_F$. Выражение для $D_{\max II}$ через базовые параметры автомобиля и коэффициент переключения

$$D_{\max II} = 1,897 \sqrt{D_{\max} k_A k_F \eta_{II} / (v_{\max} k_{\text{пер}} \eta_I)},$$

где η_I и η_{II} - КПД редуктора на первой и второй передачах. Заменив в главных соотношениях между базовыми параметрами автомобиля и основными параметрами мотор-колеса $D_{\max}$ на $D_{\max II}$, получим главные соотношения для двухскоростного мотор-колеса.

Значение отношения передаточных чисел на первой и второй передачах i_I / i_{II} влияет на кинематическую схему редуктора, которая должна допускать ступенчатое изменение передаточного числа. Отношение i_I / i_{II} и базовые параметры автомобиля связаны

следующим образом

$$i_I / i_{II} = 0,529 \sqrt{D_{\max} v_{\max} k_{\text{пер}} \eta_{II} / (k_A k_F \eta_I)}.$$

Максимальное значение отношения имеет место при $k_{\text{пер}} = k_F$, минимальное - при $k_{\text{пер}} = 1$. Поиск рационального значения $k_{\text{пер}}$ требует анализа таких факторов, как необходимость уменьшить размеры и массу электродвигателя для улучшения компоновочных и конструктивных свойств мотор-колеса, так и требование обеспечить работоспособность и надежность электродвигателя и агрегата в целом. Определить рациональное значение $k_{\text{пер}}$ следует с учетом теплового режима электродвигателя при движении на первой и второй передачах на основе тяговых расчетов.

Исходным фактором при выборе параметров электродвигателя мотор-колеса периодического действия является необходимая сила тяги мотор-колеса в рабочем режиме, в котором преимущественно используется электропривод. Момент электродвигателя равен

$$M_{\text{г раб}} = F_{\text{пр}} / (m_{\text{г пр}} i_p \eta_p r_{\text{к ср}}),$$

где $F_{\text{пр}}$ - сила тяги прицепа; $m_{\text{г пр}}$ - число мотор-колес прицепа; $r_{\text{к ср}}$ - средний радиус качения колес прицепа.

Мощность, реализуемая электродвигателем в рабочем режиме,

$$P_{\text{г раб}} = M_{\text{г раб}} n_{\text{г раб}} / 3600,$$

где $n_{\text{г раб}}$ - частота вращения электродвигателя в рабочем режиме.

Соотношение между мощностью, реализуемой электродвигателем в рабочем режиме, и его длительной мощностью зависит от длительности и периодичности включения электропривода. При определении допустимой однократной длительности включения электродвигателя необходимо учитывать длительность перерыва между включениями и условиями охлаждения электродвигателя.

Передаточное число редуктора мотор-колеса с асинхронным двигателем при механическом приводе колес тягача [20]:

$$i_p = (1 - S_{\text{раб}}) (p_2 / p_g) (i_{\text{тяг}} / i_{p_2}) (r_{\text{к пр}} / r_{\text{к тяг}}),$$

где $S_{\text{раб}}$ - рабочее скольжение асинхронного двигателя; p_g и p_2 - число пар полюсов генератора переменного тока и асинхронного двигателя; $i_{\text{тяг}}$ и i_p - передаточные числа привода тягача и редуктора генератора; $r_{\text{к тяг}}$ и $r_{\text{к пр}}$ - радиусы качения колес тягача и прицепа.

В случае применения в мотор-колесе электродвигателя постоянного тока и гидромеханического привода колес тягача передаточное число редуктора

$$i_p = (i_{\text{тяг}} / i_{2m}) (r_{\text{г раб}} / n_{\text{мг в}}) (r_{\text{к пр}} / r_{\text{к тяг}}),$$

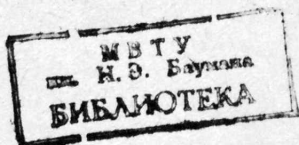
где i_{2m} - передаточное отношение гидротрансформатора в рабочем режиме с включенным приводом прицепа, $n_{\text{мг в}}$ - частота вращения теплового двигателя при максимальной мощности.

Динамика исследуемых систем привода с мотор-колесами

Для изучения динамики электромеханической системы "тепловой двигатель - генератор - мотор-колеса - автомобиль" предложена общая математическая модель, представляющая собой совокупность эквивалентной схемы исследуемой системы и дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих ее движение.

При создании модели учитывают: приращения внешних моментов теплового двигателя, обусловленные изменением его угловой частоты при увеличении или уменьшении подачи топлива или изменении момента сопротивления на валу $M_{\text{мг}}(\psi_{\text{мг}})$ и переменных по времени суммарных инерционных сил теплового двигателя и сил давления газов, оцениваемых моментом $M_{\text{мг2}}(t)$; электромеханические связи между генератором и электродвигателями мотор-колес, в частности, связи между динамическими приращениями M_2 и M_9 основных составляющих их моментов, выражаемые как функции угловой частоты генератора ψ_2 и электродвигателей ψ_9 и зависящие от их ускорений $\ddot{\psi}_2$ и $\ddot{\psi}_9$; переменные по времени высокочастотные составляющие моментов генератора $\tilde{M}_2$ и электродвигателей $\tilde{M}_9$, являющиеся функциями переменных составляющих угловых частот; переменные по времени составляющие моментов шестерен планетарных редукторов мотор-колес M_{x_1} и M_{x_2} , возникновение которых обусловлено неточностями зацепления; изменяющиеся по времени моменты сопротивления качению движителей и других сил, действующих на массу автомобиля, оцениваемых моментом $M_{\text{кс}}$. В модель вводят окружной зазор подсистемы мотор-колеса, отнесенный к выбранному элементу подсистемы. Модель должна учитывать колебания реактивных контуров теплового двигателя и генератора, а также электродвигателей и редукторов мотор-колес.

В эквивалентной схеме исходной системы мотор-колеса моменты инерции сосредоточенных масс, податливости связей и коэффициенты демпфирования приводят к выбранному участку эквивалентной



M421324

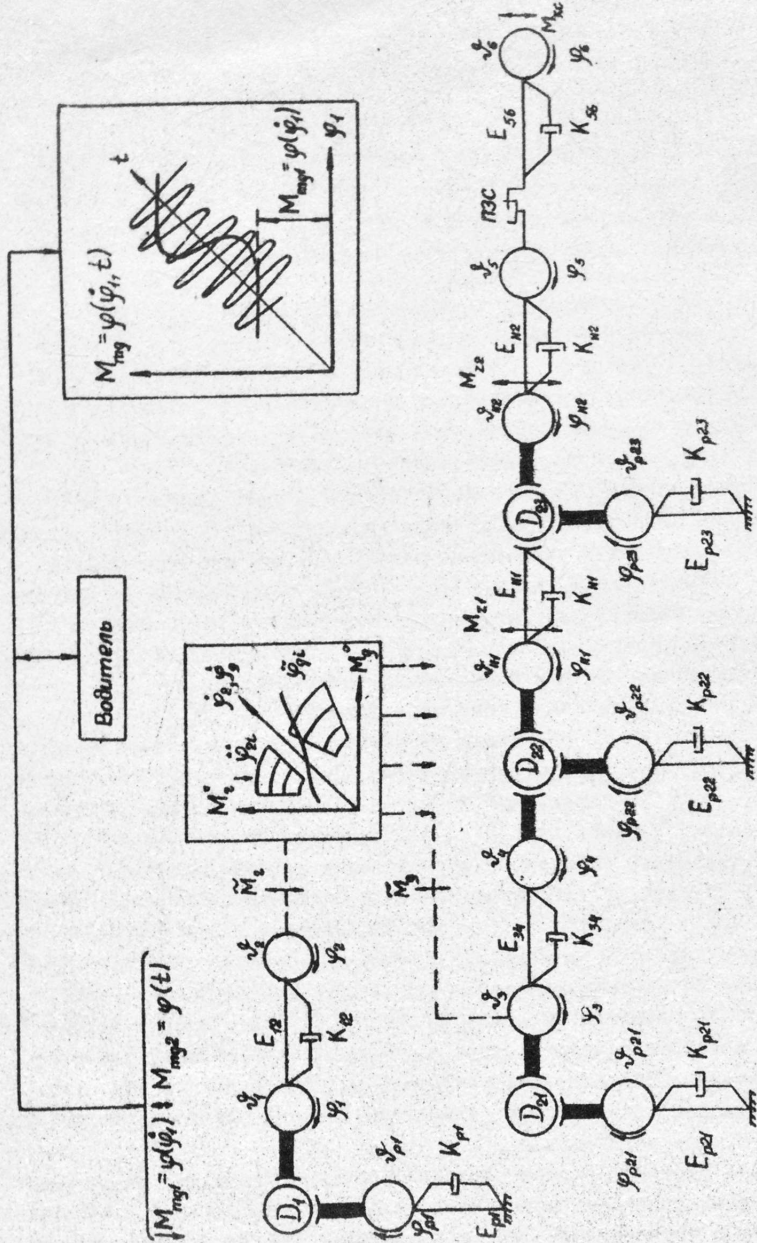


Рис. 1. Эквивалентная схема системы "тепловой двигатель - генератор - автомобиль - автомобиль"

схемы (якоря электродвигателя), пользуясь известными соотношениями. Для приведения используют передаточные числа $i_K = n_0/n_{\text{эк}}$ для каждого "К" - того приводимого элемента, частота вращения которого отличается от частоты вращения электродвигателя. Передаточное число i_K для участков, включающих элементы подвески мотор-колеса, находят в предположении, что ведущее колесо заблокировано, но при этом снята внешняя опора с того элемента механической передачи, на который действует реактивный момент со стороны упругого элемента системы подвески.

Все элементы эквивалентной схемы после приведения имеют частоту вращения электродвигателя. Для учета реактивных контуров использовано представление о дифференциальном механизме в схемах с прилегающими реактивными блоками. В эквивалентную схему подсистемы мотор-колеса введено три значения приведенной податливости реактивного контура по числу реактивных ветвей, соответствующих трем моментам, приложенным к корпусу электродвигателя, коронным шестерням первого и второго рядов редуктора (предполагая, что двухрядный редуктор имеет общую заторможенную коронную шестерню). Значение передаточного числа для первой ветви реактивного контура составляет I , для второй ветви K_1 , для третьей ветви $(K_1+1)K_2$.

В случае двухскоростных мотор-колес каждому передаточному числу соответствует собственная эквивалентная схема.

На рис. I приведена эквивалентная схема рассматриваемой подсистемы. Она включает следующие элементы:

а) приведенные моменты инерции (Н.м.с²): J_1 - вала теплового двигателя и связанных с ним деталей; J_2 - якоря (ротора) генератора; $J_{\text{рв}}$ - реактивной массы двигатель-генератора; J_3 - якоря (ротора) электродвигателя; J_4 - деталей механической передачи, непосредственно связанных с валом электродвигателя (тормозный вал, солнечная шестерня первого ряда); $J_{\text{н1}}$ - водила с сателлитами первого ряда редуктора и солнечной шестерни второго ряда; $J_{\text{н2}}$ - водила с сателлитами второго ряда редуктора; J_5 - колеса, вращавшихся деталей подшипников, ступицы и тормоза; J_6 - части массы автомобиля; $J_{\text{рз1}}, J_{\text{рз2}}, J_{\text{рз3}}$ - реактивной массы мотор-колеса соответственно в первой, второй и третьей ветвях реактивного контура подсистемы;

б) приведенные податливости связей на кручение (рад/Н.м): E_{12} - механизма соединения валов теплового двигателя и генератора -

ра и вала генератора; E_{p1} - ветви реактивного контура двигатель-генератора; E_{34} - вала якоря (ротора) электродвигателя и механизма соединения валов электродвигателя и редуктора; E_{n1} - валила первого ряда редуктора; E_{n2} - валила второго ряда редуктора; E_{p21} , E_{p22} , E_{p23} - первой, второй и третьей ветвей реактивного контура подсистемы мотор-колеса; E_{56} - шины;

в) коэффициенты демпфирования (Н.м.с/рад):

K_{12} - механизма соединения валов теплового двигателя и генератора и вала генератора; K_{p1} - ветви реактивного контура двигатель-генератора; K_{34} - механизма соединения валов электродвигателя и редуктора и вала электродвигателя; K_{n1} - валила первого ряда редуктора; K_{n2} - валила второго ряда редуктора; K_{p21} , K_{p22} , K_{p23} - первой, второй и третьей ветвей реактивного контура подсистемы мотор-колеса; K_{56} - шины;

г) дифференциальные механизмы и другие элементы:

D_1 - ветви реактивного контура двигатель-генератора; D_{21} , D_{22} , D_{23} - первой, второй и третьей ветвей реактивного контура подсистемы мотор-колеса; CY - система управления электроприводом; $ПЗС$ - приведенный (с использованием передаточных чисел l_k) зазор подсистемы мотор-колеса.

На эквивалентной схеме указаны действующие на систему моменты, приведенные к валу электродвигателя с учетом передаточных чисел l_k , а также угловые перемещения сосредоточенных масс.

На основании уравнений Лагранжа 2-го рода получим дифференциальные уравнения второго порядка, описывающие динамику рассматриваемой системы:

$$J_1 \ddot{\varphi}_1 + M_{12} = M_{mg1}(\dot{\varphi}_1) + M_{mg2}(t);$$

$$J_2 \ddot{\varphi}_2 - M_{12} = -M_2^0(\dot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_2) - \tilde{M}_2(\dot{\varphi}_2);$$

$$J_{p1} \ddot{\varphi}_{p1} - M_{12} + M_{p1} = 0;$$

$$J_3 \ddot{\varphi}_3 + M_{34} = M_9^0(\dot{\varphi}_3, \ddot{\varphi}_3) + \tilde{M}_9(\dot{\varphi}_3);$$

$$J_{p21} \ddot{\varphi}_{p21} - M_{34} + M_{p21} = 0;$$

$$J_4 \ddot{\varphi}_4 - M_{34} + M_{n1} = 0;$$

$$\begin{aligned}
J_{H1} \ddot{\psi}_{H1} - M_{H1} + M_{H2} &= M_{z1} ; \\
J_{p22} \ddot{\psi}_{p22} - M_{H1} + M_{p22} &= 0 ; \\
(J_{H2} + J_5) \ddot{\psi}_{H2} - M_{H2} + M_{56} &= M_{z2} ; \\
J_{p23} \ddot{\psi}_{p23} - M_{H2} + M_{p23} &= 0 ; \\
J_6 \ddot{\psi}_6 - M_{56} &= M_{KC} .
\end{aligned}$$

Выражения для моментов на участках следующие:

$$\begin{aligned}
M_{12} &= (1/E_{12})(\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_{p1}) + K_{12}(\dot{\psi}_1 - \dot{\psi}_2 - \dot{\psi}_{p1}) ; \\
M_{p1} &= (\varphi_{p1}/E_{p1}) + K_{p2} \dot{\psi}_{p1} ; \\
M_{34} &= (1/E_{34})(\varphi_3 - \varphi_4 - \varphi_{p21}) + K_{34}(\dot{\psi}_3 - \dot{\psi}_4 - \dot{\psi}_{p21}) ; \\
M_{p21} &= (\varphi_{p21}/E_{p21}) + K_{p21} \dot{\psi}_{p21} ; \\
M_{H1} &= (1/E_{H1})(\varphi_4 - \varphi_{H1} - \varphi_{p22}) + K_{H1}(\dot{\psi}_4 - \dot{\psi}_{H1} - \dot{\psi}_{p22}) ; \\
M_{H2} &= (1/E_{H2})(\varphi_{H1} - \varphi_{H2} - \varphi_{p23}) + K_{H2}(\dot{\psi}_{H1} - \dot{\psi}_{H2} - \dot{\psi}_{p23}) ; \\
M_{p22} &= (\varphi_{p22}/E_{p22}) + K_{p22} \dot{\psi}_{p22} ; \\
M_{p23} &= (\varphi_{p23}/E_{p23}) + K_{p23} \dot{\psi}_{p23} ; \\
M_{56} &= (1/E_{56})(\varphi_{H2} - \varphi_a) + K_{56}(\psi_{H2} - \varphi_a) ,
\end{aligned}$$

при условии, что $(\varphi_{H2} - \varphi_a) > \alpha_3$, где α_3 — приведенный зазор подсистемы мотор-колеса; если $(\varphi_{H2} - \varphi_a) \leq \alpha_3$, то $M_{56} = 0$.

Подсистема мотор-колеса обладает малой податливостью. Относительно большой податливостью могут обладать только механизм соединения валов электродвигателя и редуктора, шина и упругие элементы подвески, работающие на кручение. Подсистема включает элемент с большим моментом инерции — якорь (ротор) электродвигателя, вал которого обычно имеет постоянную кинематическую связь с редуктором. В механической передаче обычно отсутствуют элементы со значительной демпфирующей способностью.

В подсистеме мотор-колеса динамические процессы обусловлены

периодическим перераспределением накопленной энергии: кинетическая энергия вращающихся элементов системы переходит в потенциальную энергию упругих деформаций деталей передачи, шины и элементов подвески, а затем имеет место обратный переход.

На работоспособность механической передачи мотор-колес влияют динамические процессы трех видов: резонанс крутильных колебаний, переходный процесс, сопровождаемый динамическим ударом, автоколебательный процесс.

Может иметь место как прохождение через резонанс, так и установившийся резонанс. Наибольшую опасность представляет установившийся резонанс при достаточно высоких скоростях автомобиля. Прохождение через резонанс в зоне низких скоростей допустимо вследствие его кратковременности.

Причинами возникновения вынужденных крутильных колебаний в системе являются периодические возмущающие силы, обуславливающие появление моментов $M_{mg2}(t)$, M_2 , M_g , M_{kc} . Имеют место параметрические возбуждаемые колебания, вызывающие появление моментов M_{z1} и M_{z2} . Это может привести к появлению нескольких зон главного резонанса по числу собственных частот свободных колебаний системы. Амплитуды колебаний при резонансе ограничиваются диссипативными силами системы. Однако если относительные угловые смещения и не выходят за пределы допустимых, то неизбежно накопление усталостных явлений и ускоренный износ деталей передачи.

Явление динамического удара в подсистеме мотор-колеса при переходных процессах связано со значительным изменением кинетической энергии якоря за короткое время, причем максимальная амплитуда процесса зависит от окружного зазора передачи. Для ограничения этих нагрузок следует ввести в электрическую схему узлы, снижающие момент электродвигателя в период устранения окружного зазора и ограничивающие частоту вращения ввешенного колеса.

Процессы в механической передаче мотор-колеса, возникающие при движении автомобиля с пробуксовыванием мотор-колеса или при буксовании без поступательного движения, относятся к автоколебаниям, которые приводят к установившемуся процессу с постоянными амплитудами и частотой. В мотор-колесах уровень нагрузок при автоколебаниях будет ниже, чем в механических трансмиссиях автомобилей, поскольку при буксовании мотор-колеса заметно снижается

момент электродвигателя, а амплитуда автоколебаний зависит от соотношения момента приводного двигателя и допустимого момента по сцеплению, отнесенного к валу приводного двигателя.

Совпадение зон резонанса с рабочим диапазоном частот вращения электродвигателя в области средних и больших значений n_g обуславливает возникновение установившегося резонанса крутильных колебаний, который может иметь сравнительно большую длительность. Это окажет отрицательное влияние на долговечность агрегата. Поэтому следует прогнозировать вероятные значения собственных частот свободных колебаний для вновь создаваемых мотор-колес и разработать соответствующие меры по предупреждению установившегося резонанса крутильных колебаний в подсистеме. Необходимым этапом такого прогнозирования является определение собственных частот подсистемы мотор-колеса [26, 31].

При определении собственных частот $\sqrt{\Delta_n}$ (n – индекс свободного колебания) подсистемы мотор-колеса используется семимассовая эквивалентная схема, представляющая собой часть эквивалентной схемы системы (см. рис. 1). В ней не учитываются диссипативные силы, динамические моменты и приведенный окружной зазор.

Для составления дифференциальных уравнений, описывающих свободные колебания эквивалентной схемы, использовано уравнение Лагранжа 2-го рода в обобщенных координатах, записанное в виде:

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i} = 0.$$

Записав выражения для кинетической K и потенциальной Π энергии, а также для производных $(d/dt)(\partial K/\partial \dot{\varphi}_i)$ и $\partial \Pi/\partial \varphi_i$, составим систему семи дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих свободные колебания подсистемы мотор-колеса. Для ее решения получаем амплитудные уравнения и составляем определитель из коэффициентов при величинах амплитуд. Последующее решение определителя при помощи ЭЦМ дает значения свободных колебаний системы. Практическое использование этого метода показало его эффективность для выявления зон резонанса.

Анализ факторов, влияющих на количественную сторону электро-механической связи между электрической и механической частями электропривода автомобилей, указывает на возможность рассматривать электрические и механические процессы отдельно и, следовательно, отождествлять собственные и резонансные частоты.

Прогнозирование зон резонанса основано на зависимости инерционных свойств и в известной мере податливости связей системы мотор-колеса от базовых параметров автомобиля. Полученные главные соотношения базовых параметров и основных параметров мотор-колеса позволяют установить размеры его элементов, а следовательно, моменты инерции сосредоточенных масс и оценить податливости связей подсистемы мотор-колеса.

Технические аспекты унификации электродвигателей

Развитие работ в области электропривода автомобилей требует проведения мероприятий по унификации агрегатов электропривода. Эффективность унификации агрегатов электропривода подтверждает опыт проектирования большегрузных автомобилей-самосвалов на Белорусском автомобильном заводе.

Наиболее перспективным с точки зрения унификации агрегатов электропривода является мотор-колесо, что объясняется свойством его универсальности. Известные результаты в этом отношении уже достигнуты. Возможна унификация не только мотор-колеса в целом [31], но и его отдельных элементов, в первую очередь электродвигателя. Начальным этапом унификации должна явиться разработка базового параметрического и типоразмерного ряда мотор-колес, а затем и параметрических рядов электродвигателей. Главные соотношения базовых параметров автомобиля и основных параметров электродвигателя представляют собой необходимые теоретические предпосылки для разработки параметрических рядов электродвигателей применительно к типоразмерным рядам мотор-колес.

Задачи унификации могут быть полностью решены только на основе теории оптимизации с учетом всех показателей эффективности. В данной работе рассмотрены методы сокращения числа типоразмеров электродвигателей при разработке типоразмерного ряда мотор-колес, основанном на ряде шин определенного типа, и при разработке типоразмерных рядов мотор-колес автомобилей различных групп. Решение этих задач является необходимым этапом унификации.

Общий метод сокращения числа типоразмеров электродвигателей по сравнению с числом типоразмеров мотор-колес в ряду, основанном на ряде шин определенного типа, позволяет установить основные параметры унифицированного электродвигателя для любого мотор-колеса, если известны расчетная нагрузка на шину и базовые параметры автомобиля. Этот метод предусматривает группировку

значений нагрузки на шину G_k в диапазоне $G_{kmin} \div G_{kmax}$ исходного ряда шин. Для разделения полного диапазона значений G_k на подгруппы с наибольшим G'_k и наименьшим G''_k значением нагрузки на колесо в подгруппе, необходимо выбрать отношение G'_k / G''_k , которое целесообразно принять одинаковым для всех подгрупп. При этом условии ряд наибольших значений G'_k для m подгрупп образует геометрическую прогрессию с показателем ξ . Ряд значений G'_k следует принять за базовый параметрический ряд при образовании ряда электродвигателей.

Очевидно, что задача сводится к отысканию функции $\xi(m)$, которая имеет следующий вид

$$\xi = \sqrt[m]{G_{kmax} / G_{kmin}}.$$

Серьезной технико-экономической проблемой является выбор числа подгрупп m . После выбора числа m можно определить значение ξ и составить базовый параметрический ряд

$$G'_{k(1)}, G'_{k(2)}, \dots, G'_{k(m-1)}, G_{kmax},$$

а также параметрические ряды электродвигателей, соответствующие типоразмерному ряду мотор-колес автомобилей определенной группы. При этом количество электродвигателей в ряду равно m .

Параметрические ряды позволяют определить основные параметры электродвигателя для любого мотор-колеса соответствующего типоразмерного ряда при выбранных значениях K_A и η_{gmax} . Определив необходимый номер подгруппы $(i+1)$ по значению G'_k из условия $G'_{k(i)} < G_k \leq G'_{k(i+1)}$, где i — номер подгруппы с $G'_k < G_k$, и, пользуясь параметрическими рядами, получим основные параметры унифицированного электродвигателя.

Сокращение числа типоразмеров электродвигателей при разрабатке типоразмерных рядов мотор-колес на базе шин различного типа представляет собой более сложную задачу, чем в случае одного типоразмерного ряда мотор-колес. Необходимо составить параметрические ряды электродвигателей, соответствующие различным типоразмерным рядам мотор-колес. Однако при сокращении числа типоразмеров электродвигателей в пределах нескольких типоразмерных рядов мотор-колес использование совокупности значений G'_k величины G_k в качестве базового параметрического ряда теряет смысл вследствие несовпадения базовых параметров автомобилей различных групп и параметров их шин, в частности, G'_k и их край-

них значений. Поэтому в базовых параметрических рядах G_k для типоразмерных рядов мотор-колес автомобилей различных групп значения G'_k не совпадают, вследствие чего совместное рассмотрение параметрических рядов электродвигателей не позволяет установить рациональный способ сокращения числа типоразмеров электродвигателей.

Поэтому параметр G_k следует исключить из рассмотрения и перейти от базового параметрического ряда значений G'_k к ряду значений мощности $P_{g\infty}$, взятых из параметрического ряда $P_{g\infty}$, соответствующего типоразмерному ряду мотор-колес определенной группы. При этом каждому значению G'_k будет соответствовать два предельных значения $P_{g\infty}$ при максимальном K_{Amax} и минимальном K_{Amin} значениях коэффициента энерговооруженности. Таким образом, новый базовый параметрический ряд будет иметь вид

$$P'_{g\infty(1)}, P'_{g\infty(2)}, \dots, P'_{g\infty(m-2)}, P'_{g\infty(m-1)}, P'_{g\infty(m)},$$

различающийся значениями $P'_{g\infty}$ при K_{Amax} и K_{Amin} .

Новые параметрические ряды электродвигателей, рассматриваемые совместно, образуют объединенные параметрические ряды. Необходимым условием сокращения числа типоразмеров электродвигателей в пределах нескольких типоразмерных рядов мотор-колес является ограниченное расхождение значений параметра (например, момента $M_{g\infty}$) при выбранном значении средней мощности

$$P_{g\infty}^* = (P'_{g\infty(1)} + P'_{g\infty(2)} + \dots + P'_{g\infty(q)}) / q.$$

Базовый параметрический ряд величины $P_{g\infty}$ должен характеризоваться определенным числом значений $P_{g\infty}^*$. Последние следует установить при группировке мощностей $P_{g\infty}$ с возможно малыми средними отклонениями $\Delta P_{g\infty(spr)}$ для каждой группы:

$$\Delta P_{g\infty(spr)} = [(P_{g\infty}^* - P'_{g\infty(1)}) + (P_{g\infty}^* - P'_{g\infty(2)}) + \dots + (P_{g\infty}^* - P'_{g\infty(q)})] / q$$

Найдем значение $P_{g\infty}$ для каждой из сформированных групп. Руководствуясь объединенными параметрическими рядами, установим диапазон расхождения каждого из параметров, который обозначим $P_{min} \div P_{max}$. Если этот диапазон не превышает некоторого значения, которое на основании соображений конструктивного, экономического и эксплуатационного характера можно считать допустимым, то сокращение числа типоразмеров электродвигателей достижимо.

Типовые экспериментальные исследования мотор-колес

Некоторые свойства мотор-колеса, обусловленные его основными параметрами, но связанные также с особенностями его компоновки и конструкции, нельзя описать общими аналитическими зависимостями из-за сложности выявления всех факторов, влияющих на эти свойства. Наиболее целесообразно оценивать их в процессе экспериментальных исследований, называемых типовыми, так как они касаются конкретных и аналогичных для всех мотор-колес задач и выполняются по стабильным методикам. Разделим типовые экспериментальные исследования на три вида.

Первый вид связан с анализом отнесенных к колесу электромеханических характеристик электродвигателя, предельной и частичных тяговых характеристик мотор-колеса. Второй вид включает исследование тепловых режимов основных элементов мотор-колеса и системы охлаждения. К третьему виду отнесены различные специальные исследования мотор-колес.

При исследованиях первого вида получают характеристики с учетом всех факторов, которые при теоретических исследованиях оцениваются с известным приближением. К ним относится изменение КПД элементов электропривода во всем диапазоне скорости, специфические свойства систем регулирования, температурные факторы и др. Экспериментальные электромеханические и тяговые характеристики электродвигателя и мотор-колеса позволяют провести уточненный анализ нагрузок системы электропривода в различных условиях движения.

Для исследования режимов нагружения механической передачи мотор-колеса необходимо экспериментально определить закон изменения электромагнитного момента электродвигателя при различных условиях движения автомобиля.

Ко второму виду типовых исследований отнесено изучение режимов нагрева и охлаждения электродвигателя, редуктора, механического тормоза. Эти задачи теоретическими методами могут быть решены весьма приближенно, поскольку в тепловом расчете агрегата трудно учесть факторы, определяемые компоновкой мотор-колеса.

Важное значение для характеристики перегрузочной способности электродвигателя имеет оценка допустимой длительности перегрузок при различной температуре обмоток, предшествующей перегрузке. Необходимо также установить влияние расхода охлаждающего воздуха на допустимую длительность перегрузки при определенной кратности

момента электродвигателя по отношению к длительному. Для этого нужно исследовать зависимость установившегося перегрева обмоток от расхода воздуха при различных токах и соответствующем напряжении (и частоте—для асинхронных двигателей). Необходимо также определить напор воздуха в подводящей части воздухопровода мотор-колеса для обеспечения номинального расхода охлаждающего воздуха и потребляемую на вентиляцию мощность.

Важное значение для оценки работоспособности мотор-колеса при данной компоновке и конструкции представляет определение теплового режима масла редуктора в характерных режимах работы по предельной тяговой характеристике $F_k V = \text{const}$.

К третьему виду типовых исследований отнесено определение некоторых специальных параметров мотор-колеса. Мощность, потребляемая электродвигателем мотор-колеса при его вращении в вращенном состоянии, позволяет оценить качество его изготовления и сборки. Важное значение имеет определение КПД мотор-колеса при работе по характеристике $F_k V = \text{const}$. Момент инерции мотор-колеса необходим при оценке динамических свойств автомобиля. При исследовании механизмов сцепления мотор-колес периодического действия и механизмов переключения двухскоростных мотор-колес определяется время включения и выключения—включения, остаточные потери на трение в отключенных фрикционных механизмах, изменение температуры дисков фрикционных механизмов за один рабочий цикл.

Отдельные виды типовых исследований выполняются на специальных стендах по стабильным методикам [10, 24]. На стенде НАМИ проведены типовые исследования мотор-колес различного типа.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Создана теория мотор-колеса, включающая следующие разделы: обоснование принципиальной возможности изучения определенных свойств мотор-колеса независимо от других элементов электропривода автомобиля; исследование уровня нагрузки электродвигателей мотор-колес автомобилей различного типа; получение аналитических зависимостей основных параметров мотор-колеса от главных эксплуатационных (базовых) параметров автомобиля с электроприводом; исследование динамики системы "тепловой двигатель — генератор — мотор-колеса — автомобиль" и подсистемы мотор-колеса; исследование технических аспектов унификации мотор-колес; рекомендации по объему и методам типовых экспериментальных исследований мотор-колес.

Созданный на основе теории мотор-колеса метод его проектирования и расчета позволяет на начальной стадии разработки решить важную технико-экономическую задачу по созданию агрегата, параметры которого соответствуют техническим характеристикам и условиям движения автомобиля.

Решение проблемы метода проектирования и расчета мотор-колес автомобилей является основным результатом работы.

2. Разработан метод исследования уровня нагрузки электродвигателя мотор-колеса, предложен параметр уровня нагрузки - среднее эксплуатационное значение удельной силы тяги и установлены его численные значения для автомобилей различных групп. Основными исходными факторами при исследовании этого параметра являются ряды распределения коэффициента общего сопротивления движению и длины перегонов для автомобилей данной группы. Ряды распределения получены методами математической статистики с использованием данных, накопленных при дорожных испытаниях автомобилей.

3. Установлены основные и производные базовые параметры автомобиля с электроприводом. К основным отнесены нагрузка на шину, максимальные значения скорости и динамического фактора, удельная расчетная мощность, к производным - коэффициенты энерговооруженности мотор-колеса, допустимой перегрузки электродвигателя мотор-колеса, относительной жесткости механической характеристики электродвигателя постоянного тока, а также отношение максимальной и длительной частот асинхронного двигателя.

Установлены основные параметры мотор-колеса: параметры длительного режима электродвигателя (мощность, момент, частота вращения, частота напряжения для асинхронных двигателей), коэффициент регулирования напряжения для электродвигателей постоянного тока, основные размеры электродвигателя (диаметр и длина стального пакета якоря или статора), передаточное число редуктора, суммарная ширина зубчатых венцов шестерен всех рядов редуктора, "активный" объем редуктора. Получены главные соотношения базовых параметров автомобиля и основных параметров мотор-колеса (односкоростного и двухскоростного, а также периодического действия).

4. Разработана математическая модель системы "тепловой двигатель - генератор - мотор-колеса - автомобиль" для исследования динамики систем этого класса. Она представляет собой совокупность эквивалентной схемы исходной системы и дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих ее движение. Для анализа динамики

подсистемы мотор-колеса любого типа предложена эквивалентная схема, включающая в общем случае шесть сосредоточенных масс и массу реактивного контура. Рассмотрены процессы трех видов: резонанс крутильных колебаний, переходный процесс, сопровождаемый динамическим ударом, автоколебательный процесс.

Наибольшее влияние на работоспособность механической передачи мотор-колеса оказывает установившийся резонанс. Обоснована необходимость прогнозирования вероятных зон установившегося резонанса в системе при выборе параметров мотор-колеса. Предложены способы смещения резонансных зон за пределы рабочей частоты вращения.

5. Предложены методы сокращения числа типоразмеров электродвигателей при разработке типоразмерного ряда мотор-колес на базе шин определенного типа и при разработке типоразмерных рядов мотор-колес на базе шин различного типа.

6. Рекомендованы три вида типовых экспериментальных исследований, касающихся электромеханических характеристик мотор-колеса, режимов нагрева и охлаждения его элементов и некоторых специальных свойств агрегата.

7. Обоснованность научных положений и рекомендаций подтверждена в процессе создания образцов мотор-колес на предприятиях автомобильной промышленности и их исследований в различных условиях. Под руководством соискателя в НАМИ разработаны двенадцать образцов мотор-колес различного типа, из них мотор-колеса восьми типов были изготовлены и исследованы на стенде, а мотор-колеса шести типов исследованы также на автомобилях и автопоездах.

8. Новизна и эффективность выполненных исследований подтверждены авторскими свидетельствами на шесть образцов мотор-колес и на специальный стенд. Мотор-колесо для автобуса типа 6х4 отмечено золотой медалью и дипломом XX Международной промышленной ярмарки в г.Брно (ЧССР).

Материалы диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1. Яковлев А.И., Свириденко И.С., Козловский А.Б. Особенности работы силовых передач при общем и раздельном электроприводе. - Автомобильная промышленность, 1963, №5, с.31-34.

2. Яковлев А.И., Буралев Ю.В., Виторнов В.Г. Особенности мотор-колес транспортных машин с электроприводом. - Труды НАМИ, 1964, вып.65, с.48-75.

3. Яковлев А.И., Смирнов А.Г. Некоторые вопросы применения элект-

троспривода на колесных транспортных машинах. - Труды/НАМИ, 1964, вып. 65, с. 3-47.

4. Яковлев А.И., Смирнов А.Г., Эдинов А.А. Электропривод безрельсовых транспортных машин. - Автомобилестроение. - М.: ЦИНТИАМ, 1964. - 82с.

5. Выборнов В.Г. и др. Электромотор-колеса транспортных машин. / В. Выборнов, Б. Гушо-Малков, И. Курзель, А. Яковлев. - М.: НИИ Навтосельхозмаш, 1965. - 56с.

6. Яковлев А.И. Электропривод автомобилей и автопоездов. - М.: Машиностроение, 1966. - 200с.

7. Яковлев А.И. и др. Особенности работы электромотор-колес транспортных машин. / А. Яковлев, Б. Гушо-Малков, Ю. Буралев, И. Бурлакова. - Автомобилестроение. - М.: НИИ Навтопром, 1966. - 60с.

8. Буралев Ю.В. и др. Новые конструкции электромотор-колес. / Ю. Буралев, В. Выборнов, Б. Гушо-Малков, А. Яковлев. - Автомобилестроение. - М.: НИИ Навтопром, 1967. - 64с.

9. Ефремов И.С., Яковлев А.И., Гушо-Малков Б.П. Электрический привод с автономным питанием на колесах безрельсового транспорта. - Электричество, 1967, №7, с. 73-78.

10. А.с. 211.866 (СССР). Стенд для испытаний приводов транспортных машин с мотор-колесами. / Г.А. Богданов, Ю.В. Буралев, И.М. Бурлакова и др. - Опубликовано в Б.И., 1968, №8.

11. Яковлев А.И., Козловский А.Б., Фельдман Ю.И. Электропривод на переменном токе с преобразователем частоты для безрельсовых транспортных машин. - Труды/НАМИ, 1968, вып. 100, с. 3-35.

12. Яковлев А.И., Гушо-Малков Б.П., Выборнов В.Г. Вопросы кинематики и КПД редукторов мотор-колес. - Труды/НАМИ, 1968, вып. 101, с. 3-26.

13. Яковлев А.И., Буралев Ю.В. Исследование некоторых параметров односкоростных и двухскоростных мотор-колес. - Труды/НАМИ, 1968, вып. 103, с. 146-165.

14. А.с. 255.787 (СССР). Двухскоростное электромотор-колесо. / В.Г. Выборнов, А.И. Яковлев. Заявитель НАМИ. Выдано 11.08.1969.

15. Яковлев А.И., Козловский А.Б., Сафаров Ю.Е. Особенности асинхронного привода активных полуприцепов двухзвенных автопоездов. - Автомобильная промышленность, 1969, №12, с. 17-20.

16. Яковлев А.И., Максимов А.Н., Козловский А.Б. О динамических нагрузках механической передачи мотор-колес. - Труды/НАМИ, 1970, вып. 126, с. 3-19.

17. Яковлев А.И., Бурлакова И.М. О выборе оптимальной механичес-

кой характеристики тяговых электродвигателей постоянного тока, применяемых в мотор-колесах. - Труды/НАМИ, 1970, вып. I26, с. 38-56.

18. Яковлев А.И., Сафаров Ю.Е., Козловский А.Б. Об уточнении величины критического скольжения асинхронных двигателей электропривода периодического действия автопоезда. - Труды/НАМИ, 1970, вып. I26, с. 20-29.

19. Яковлев А.И., Сафаров Ю.Е., Козловский А.Б. Метод расчета напряжения электропривода периодического действия полуприцепа автопоезда. - Труды/НАМИ, 1970, вып. I26, с. 30-37.

20. Яковлев А.И. Конструкция и расчет электромотор-колес. - М.: Машиностроение, 1970. - 239с.

21. А.с. 382.529 (СССР). Двухступенчатая коробка передач мотор-колеса. /В.Г. Выборнов, В.П. Леандров, А.И. Яковлев. - Опубл. в Б.И., 1973, #23.

22. Яковлев А.И. Методика определения основных параметров электродвигателя мотор-колеса. - Труды/НАМИ, 1973, вып. I45, с. 3-25.

23. Яковлев А.И., Корягина В.В., Никоноров В.А. Определение основных размеров планетарных редукторов мотор-колес транспортных машин. - Известия ВУЗов. Машиностроение, 1974, #2, с. I27-I31.

24. Гушо-Малков Б.П., Эйдинов А.А., Яковлев А.И. Универсальный стенд для испытаний системы электропривода транспортных машин с мотор-колесами. - Труды/НАМИ, 1974, вып. I47, с. 35-42.

25. Яковлев А.И. Определение допустимой перегрузки электродвигателей мотор-колес. - Экспресс-информация. Конструкция автомобилей. - М.: НИИНавтопром, 1975, #1, с. 22-29.

26. Яковлев А.И., Семенов В.М., Эйдинов А.А. Метод определения собственных частот крутильных колебаний мотор-колес автомобилей. - Автомобильная промышленность, 1976, #6, с. I7-I9.

27. А.с. 559.847 (СССР). Мотор-колесо. /Н.Ф. Бочаров, В.Г. Выборнов, Е.М. Дмитриев и др. - Опубл. в Б.И., 1977, #22.

28. Яковлев А.И. Методика определения основных параметров электродвигателя двухскоростного мотор-колеса. - Труды/НАМИ, 1978, вып. I71, с. 3-I4.

29. А.с. 742.179 (СССР). Электромотор-колесо. /А.В. Чанков, П.И. Присяжный, И.В. Пименов и др. - Опубл. в Б.И., 1980, #23.

30. А.с. 765.036 (СССР). Мотор-колесо транспортного средства. /А.И. Яковлев, Г.С. Звездина, М.С. Чичерский, П.И. Мохов. - Опубл. в Б.И., 1980, #35.

31. Яковлев А.И. Конструкция и расчет электромотор-колес. 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1981, 190с.