

На правах рукописи

Согрин Андрей Игоревич

**СИСТЕМА АВАРИЙНОГО ТОРМОЖЕНИЯ
ИНВАЛИДНОГО КРЕСЛА-КОЛЯСКИ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

2007

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика и электромеханические системы» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
Воронин Сергей Григорьевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Уфимцев Сергей Алексеевич;
кандидат технических наук, доцент
Лях Николай Ефимович.

Ведущая организация — Уральский государственный технический
университет (УГТУ–УПИ), г. Екатеринбург.

Защита состоится 25 октября 2007 г., в 12 часов, в ауд. 1013 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан « ____ » сентября 2007 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: (351) 267-91-72,
E-mail: kdv@susu.ac.ru.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

Ю.С. Усынин

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания надежных, экономичных и удобных в эксплуатации индивидуальных транспортных средств с электроприводом для инвалидов. Использование инвалидного кресла-коляски (ИКК) с электрическим приводом открывает перед такими людьми более широкие возможности в плане самореализации, а для некоторых инвалидов передвижение на коляске с электрической тягой является единственно возможным способом перемещаться самостоятельно.

Использование электрической тяги для привода инвалидной коляски выдвигает на первый план проблемы, не свойственные ИКК с ручным приводом, прежде всего, проблемы качества движения — перемещение на ИКК с электроприводом должно быть комфортным и безопасным.

Проблемам электроприводных ИКК посвящены работы А.Б. Петленко, Н.Ф. Васильева, А.Л. Логинова, А.Н. Чмыхова, Аль-масуда Тауфик. В работах рассматриваются вопросы разработки ходовой части, электропривода, системы управления, алгоритмов управления, системы электроснабжения, оптимизации энергопотребления. Вопросам безопасности движения уделено внимание в работах А.В. Батаева.

Наиболее перспективным для применения в ИКК по технико-экономическим и эксплуатационным показателям является безредукторный электропривод с мотор-колесами. При соответствующем построении и алгоритмическом обеспечении системы управления безредукторный привод предоставляет самые широкие возможности по обеспечению безопасности и комфортности движения. В то же время для безредукторного электропривода характерна проблема замедления и остановки коляски при пропадании питания на двигателях, когда нет никаких тормозящих сил, противодействующих движению, кроме незначительных сил трения. Известное решение указанной проблемы — введение в состав электропривода электромагнитного нормально замкнутого пружинного тормоза, блокирующего вал двигателя при аварии, существенно увеличивает энергопотребление привода и используется лишь в редукторных ИКК. В безредукторном варианте привода тормозной момент приходится прикладывать непосредственно к колесу, что недопустимо увеличивает энергопотребление тормоза.

Для повышения безопасности движения безредукторного ИКК необходимо введение в состав его электропривода аварийного тормозного устройства, по своим функциям подобного тормозу редукторных колясок, но с учетом ограничений, накладываемых системой электроснабжения ИКК. Адекватного решения указанной проблемы нет.

Цель работы — повышение безопасности движения ИКК с электрической тягой путем введения в состав электропривода аварийной тормозной системы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать динамику движения ИКК в режиме торможения;
- построить математическую модель движения ИКК в тормозных режимах для определения необходимых тормозных усилий и закономерности их изменения;

- сформулировать требования к тормозным устройствам ИКК;
- проанализировать существующие системы аварийного торможения электроприводов;
- разработать принципы построения и алгоритмы работы систем аварийного торможения ИКК с электроприводом;
- разработать методику проектирования тормозных устройств для электроприводных ИКК.

Методы исследования

В работе использовались методы теории поля, теории электрических и магнитных цепей, планирования эксперимента, теоретической механики, цифрового моделирования на ЭВМ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечиваются корректным использованием выбранных методов исследования и подтверждаются результатами моделирования на ЭВМ и экспериментальными исследованиями.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- результаты анализа движения ИКК в режиме аварийного торможения;
- новый принцип построения системы аварийного торможения ИКК с электроприводом;
- новая конструкция тормозного устройства для ИКК;
- математическая модель электромагнитного тормоза новой конструкции;
- методика проектирования устройств аварийного торможения.

Научное значение результатов работы

1. Разработана математическая модель устройства аварийного торможения, на основании которой создана методика оптимизации его конструкции по массогабаритным и энергетическим показателям.
2. Разработана методика проектирования устройств аварийного торможения для электроприводных ИКК.
3. Теоретически обоснован и предложен алгоритм управления аварийным тормозом, позволяющий реализовать плавное, безопасное торможение ИКК.

Практическое значение работы

1. Предложен новый принцип организации системы аварийного торможения ИКК с безредукторным электроприводом, обеспечивающий безопасность ее движения в аварийных режимах при минимальном энергопотреблении.
2. Разработана новая конструкция тормозного устройства для ИКК с безредукторным электроприводом, реализующая предложенные принципы.
3. Разработана функциональная схема системы аварийного торможения ИКК с безредукторным электроприводом.

Реализация результатов работы

На основе предложенных принципов и конструкций создана система аварийного торможения для электроприводной инвалидной коляски БК-35, выпускаемой ОАО «Уфимский завод металлических и пластмассовых изделий» и вошедшей в список ста лучших товаров России в 2005 г.

Материалы диссертационной работы применяются при чтении лекций в курсах «Электрические машины», «Электрические и электронные аппараты» для студентов специальностей 140601 — «Электромеханика» и 140609 — «Электрооборудование летательных аппаратов».

Апробация работы

Основные положения диссертации рассматривались и обсуждались: на заседании XXII Российской школы по проблемам науки и технологий, г. Миасс, 2002;

на научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, 2002–2007.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ общим объемом 22 печатные страницы.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из Введения, четырех глав основного текста объемом 143 страниц, Заключения, списка литературы из 144 наименований, восьми приложений. Общий объем диссертации — 188 страниц, включая 64 рисунка и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** раскрывается актуальность темы диссертации, формируется цель работы, излагаются основные задачи диссертации и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены принципы построения электроприводов современных ИКК, проанализированы проблемы, характерные для безредукторного привода ИКК, рассмотрены возможные пути решения проблемы аварийного торможения ИКК, сделаны обоснованные выводы об отсутствии адекватного решения проблемы аварийного торможения ИКК с безредукторным приводом.

Созданием инвалидных транспортных средств занимаются во всем мире. В последнее время работы по созданию транспорта для инвалидов ведутся и в России. Как показывает статистика, Россия входит в число стран с наибольшим числом изобретений и разработок в этой области. Тем не менее, в отличие от других стран серийное производство инвалидных колясок у нас не налажено, опыт производства подобной техники пока не накоплен, поэтому зачастую иностранные аналоги переигрывают отечественные образцы по эксплуатационным и потребительским показателям, хотя часто и за счет более высокой стоимости.

В мире накоплен большой опыт разработки и производства инвалидных колясок с электроприводом. Конструкции ИКК, производимых в таких странах как ФРГ, Великобритания, США, Япония отличаются большим разнообразием: от легких, предназначенных для передвижения в основном в помещении (1.436 ACCESS 2 «Майра»), до тяжелых универсальных, содержащих кроме главного привода другие, например, подъема сидения (ИКК LY-E101), изменения угла на-

клона спинки (кресло-коляска «Про Варио» ФРГ) и другие. Существуют разработки колясок предназначенных для перемещения не только по плоскости, но и по лестничным маршам. В качестве двигателей ИКК обычно используются коллекторные двигатели постоянного тока или вентильные двигатели, число двигателей, как правило, не превышает двух. Электрический привод может быть осуществлен как на все колеса коляски, так и на колеса одной из осей. Электропривод ИКК может быть выполнен по схеме с редуктором или по безредукторной схеме с мотор-колесами.

Несмотря на большое разнообразие конструкций колясок их главный электропривод выполнен по общепринятой функциональной схеме, содержащей следующие основные функциональные узлы: орган управления; электронное управляющее устройство; приводы колес; аккумуляторная батарея; зарядное устройство. Основные различия между электроприводами заключаются в кинематической схеме механической части, то есть в связи электродвигателя с колесами: электродвигатель может быть либо непосредственно встроен в колесо, т.е. выполнен в виде мотор-колеса, созданного на основе низкооборотного моментного двигателя, либо связан с колесом через механический редуктор, либо связан с колесом через фрикционную передачу, образованную шиной и валом двигателя с соответствующей насадкой. Рейтинговое сравнение различных схем построения электропривода по массогабаритным, эксплуатационным, экономическим показателям показало, что при равенстве весовых коэффициентов безредукторный привод с мотор-колесами выигрывает по сравнению с двумя другими схемами. Преимущества безредукторного привода еще более очевидны при выдвигении на первый план требований хорошей управляемости и комфортности движения: плавность хода, отсутствие шума при движении, возможность реализации сложных алгоритмов движения путем управления скоростью и моментом каждого колеса, возможность перемещаться на коляске вручную — неоспоримые преимущества данной схемы построения электропривода.

Одной из актуальных проблем, возникающих при использовании мотор-колес в качестве движителей инвалидной коляски, является отсутствие или незначительная величина тормозного момента на колесе при отсутствии питания, при обесточивании колеса становится невозможным удержать коляску неподвижной на дороге с уклоном, создается аварийная ситуация, так как коляска становится неуправляемой.

Для организации торможения в случае аварии разработчиками чаще всего применяется ручной тормоз, что снижает безопасность перемещения на ИКК, так как для реализации торможения необходимо за ограниченный промежуток времени приложить к рычагу тормоза определенное мускульное усилие, что может являться проблемой для человека с ограниченными физическими возможностями.

Ряд разработчиков использует для аварийного торможения электромагнитный нормально замкнутый тормоз. При пропадании или снижении напряжения питания тормоз блокирует колесо, препятствуя перемещению ИКК. Как правило, такая система торможения используется в редукторном приводе, поскольку тормозной момент в данном случае может быть приложен к валу двигателя, в безре-

дукторном же варианте тормоз должен воздействовать непосредственно на колесо, что потребует создания гораздо большего тормозного момента. Основным преимуществом данной системы является ее высокая надежность, в тоже время, очевидным недостатком является значительное энергопотребление тормоза, поскольку его обмотка возбуждения большую часть времени подключена к источнику питания, что снижает эксплуатационные показатели привода: уменьшает пробег на одной зарядке аккумулятора, или увеличивает массу аккумуляторной батареи.

Таким образом, с одной стороны существует проблема торможения ИКК с безредукторным приводом в случае аварии, с другой — адекватное решения указанной проблемы, учитывающее ограниченные энергетические ресурсы ИКК, отсутствует.

Во **второй главе** рассмотрены основные закономерности движения транспортного средства при торможении, выявлены факторы, влияющие на тормозные свойства ИКК. Составлено математическое описание движения инвалидной коляски при торможении. В результате сформулированы основные требования к тормозному приводу и определены алгоритмы его работы.

При исследовании движения ИКК в режиме торможения были использованы положения теории движения колесных машин.

Главными показателям эффективности торможения являются тормозной путь и предельное замедление.

При заданной начальной скорости движения величина тормозного пути определяется замедлением ИКК при торможении:

$$S_T = \frac{V_n^2}{2a_y} + V_n \left(t_z + \frac{t_c}{2} \right) - a_y \frac{t_c^2}{24},$$

где a_y — установившееся замедление коляски, t_z — время запаздывания срабатывания тормоза, t_c — время срабатывания тормоза.

Замедление транспортного средства определяется действующими на него силами и при заданных параметрах движения не может превышать определенного значения, что связано с необходимостью сохранения управляемости и устойчивости движения коляски при торможении. Максимальное замедление может быть получено при максимальных продольных реакциях колес в плоскости дороги R_{xi} , которые ограничены силами их сцепления с опорной поверхностью ϕR_{zi} :

$$\left. \begin{aligned} R_{x1}^2 + R_{y1}^2 &\leq \phi R_{z1}^2 \\ R_{x2}^2 + R_{y2}^2 &\leq \phi R_{z2}^2 \end{aligned} \right\},$$

где R_{x1} , R_{x2} — продольные реакции в плоскости дороги, R_{y1} , R_{y2} — поперечные реакции в плоскости дороги, R_{z1} , R_{z2} — нормальные реакции опорной поверхности, ϕ — коэффициент сцепления колес с опорной поверхностью. Следует заметить, что когда продольная сила достигает своего максимального по сцеплению значения ($R_{xi} = \phi R_{zi}$), колесо теряет способность сопротивляться даже незначительной боковой силе.

При торможении всеми колесами максимально используется вес ИКК, интенсивность торможения колесами только одной оси ограничивается силами сцепления с дорогой колес этой оси. Были определены предельные тормозные силы в плоскости дороги и предельно достижимые замедления ИКК при торможении всеми колесами, при торможении только передними и только задними колесами.

$$\begin{aligned}
 F_T^{\max} &= \varphi G \cos \alpha \\
 a_T^{\max} &= g[(\varphi + f) \cos \alpha - \sin \alpha] \\
 F_{T1}^{\max} &= F_T^{\max} \frac{(1 - k_l + k_h f)}{1 - k_h \varphi} \\
 a_{T1}^{\max} &= g \left[\frac{f + (1 - k_l) \varphi}{1 - k_h \varphi} \cos \alpha - \sin \alpha \right] \\
 F_{T2}^{\max} &= F_T^{\max} \frac{(k_l - k_h f)}{1 + k_h \varphi} \\
 a_{T2}^{\max} &= g \left[\frac{f + k_l \varphi}{1 + k_h \varphi} \cos \alpha - \sin \alpha \right],
 \end{aligned}$$

здесь f — коэффициент сопротивления качению колеса, α — уклон дороги, $k_l = l_1/L$, $k_h = h_c/L$ — коэффициенты, характеризующие положение центра масс ИКК, L — расстояние между осями ИКК.

Следует заметить, что чаще всего инвалидные коляски имеют ведущие задние колеса и поворотные передние колеса — такая компоновка обеспечивает лучшую управляемость. В этой связи тормозами оснащаются только задние колеса коляски, что уменьшает предельно достижимые ускорения при торможении.

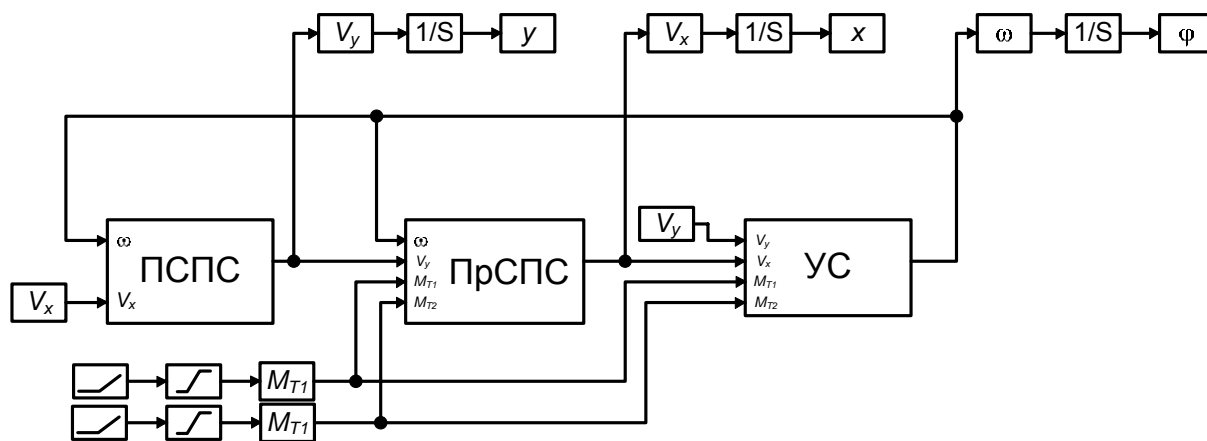
Аварийное торможение необходимо проводить с максимально возможной по условиям движения без заноса интенсивностью.

Для исследования движения коляски при торможении была использована известная математическая модель движения транспортного средства. Уравнения движения ИКК представлены в виде:

$$\begin{aligned}
 \frac{\omega}{V_x} (m V_y V_x + 2k_{y1} l_1 \sin \Theta) + 2k_{y1} \frac{V_y}{V_x} - 2k_{y1} \Theta \sin \Theta + mg \sin \alpha - (F_{T1} + F_{T2}) &= m \dot{V}_x, \\
 \frac{\omega}{V_x} (2k_{y2} l_2 - 2k_{y1} l_1 \cos \Theta - m V_x^2) - \frac{V_y}{V_x} (2k_{y1} \cos \Theta + 2 \cdot k_{y2}) + 2k_{y1} \Theta \cos \Theta &= m \dot{V}_y, \\
 -\frac{\omega}{V_x} (2k_{y1} l_1^2 \cos \Theta + 2k_{y2} l_2^2) + \frac{V_y}{V_x} (2k_{y2} l_2 - 2k_{y1} l_1 \cos \Theta) + 2k_{y1} l_1 \Theta \cos \Theta + \\
 + (F_{T1} - F_{T2}) \frac{B}{2} &= J \dot{\omega},
 \end{aligned}$$

где ω — скорость поворота ИКК вокруг оси, проходящей через ее центр масс, V_x и V_y — продольная и поперечная составляющие скорости поступательного движения центра масс, m — масса ИКК, k_{y1} , k_{y2} — коэффициенты угловой жесткости шин колес передней и задней оси, Θ — средний угол поворота передних колес, α

— угол продольного уклона дороги, g — ускорение свободного падения; l_1, l_2 — расстояние от центра масс коляски до центра передней и задней оси соответственно; B — расстояние между шкворнями колес одной оси; J — момент инерции коляски относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс. Решение записанной системы уравнений проводилось на ЭВМ. Укрупненная схема модели, составленной в программе Vissim, приведена на рис. 1.



ПСПС — поперечная составляющая поступательной скорости, ПрСПС — продольная составляющая поступательной скорости, УС — угловая скорость поворота вокруг оси, проходящей через центр масс

Рис. 1. Укрупненная схема модели движения ИКК

В результате были сделаны выводы, приведенные ниже.

Максимальная интенсивность торможения определяется только силами сцепления колес с дорогой. Устойчивость движения при торможении обеспечивается при соблюдении условия отсутствия скольжения колес. Имитировались ситуации неравенства максимальных усилий тормозов, разной скорости нарастания тормозного усилия, неодновременности срабатывания тормозов. Значительного изменения курса и траектории движения при несовпадении характеристик тормозов колес разных бортов не происходит. Наиболее неблагоприятный случай — неравенство максимальных значений усилий. В этой ситуации наблюдается значительное увеличение тормозного пути. В конце главы на основании проведенных исследований сформулированы требования к тормозным системам ИКК.

В **третьей главе** предложена новая концепция построения системы аварийного торможения и произведено ее сравнение с существующими системами, предложены варианты реализации новой системы торможения, разработана новая конструкция тормозного устройства для ИКК, предложены алгоритмы управления разработанным тормозным устройством, даны рекомендации для инженерного проектирования устройств аварийного торможения для ИКК.

Произведенные расчеты показали, что энергопотребление тормоза традиционной конструкции при его установке на ИКК с безредукторным приводом составляет около 40 Вт, что соответствует энергопотреблению тягового привода при движении ИКК по прямой. На основании этого был сделан окончательный вывод

о непригодности традиционных систем аварийного торможения для применения в безредукторном приводе ИКК.

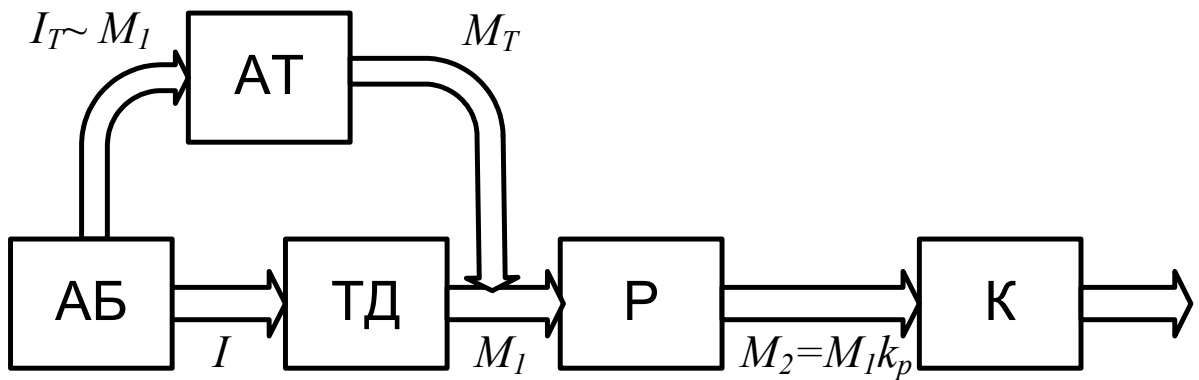
Предложен альтернативный вариант, лишенный указанного недостатка. На рис. 2 показаны функциональные схемы аварийного тормоза редукторного привода, безредукторного привода с традиционным тормозом и безредукторного привода с тормозом новой конструкции.

В качестве силового элемента аварийного тормоза предлагается использовать электромагнитное устройство, работающее как защелка. Предлагаемое устройство не потребляет энергии источника ни во включенном состоянии, ни в выключенном. Относительно небольшая энергия нужна лишь для того, чтобы перевести устройство из одного состояния в другое. В крайних положениях тормоз фиксируется либо механически, либо посредством магнитного поля постоянных магнитов и не потребляет энергию от источника.

Поскольку аварийная система должна функционировать и при пропадании питания, предлагается ввести в состав электропривода резервный источник сравнительно небольшой емкости. В штатном режиме работы привода аварийный источник постоянно подзаряжается от тяговой аккумуляторной батареи и при необходимости отдает энергию аварийному тормозу. Система аварийного торможения срабатывает независимо от системы управления приводом. Команда на срабатывания подается от системы управления тормозом на основании данных об уровне напряжения на двигателях ИКК. В случае снижения напряжения ниже допустимого уровня или пропадания напряжения ИКК должна быть остановлена. При срабатывании аварийного тормоза система управления ИКК блокируется. Также предусмотрена возможность срабатывания аварийного тормоза по команде системы управления ИКК, например, в случае, если момента колес не хватает для удержания ИКК на дороге с уклоном. Возможно управление тормозом по команде пассажира.

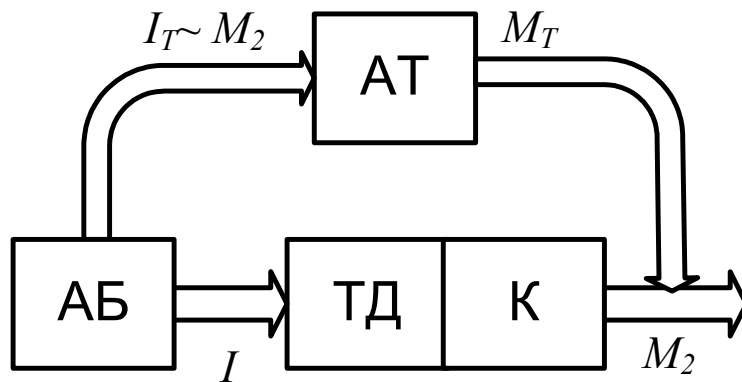
Для упрощения монтажа аварийной тормозной системы на ИКК предлагается размещать аварийный тормоз на раме ИКК, при этом силовое воздействие прикладывается к шине колеса. Такой подход позволяет, кроме того, устанавливать аварийную тормозную систему на уже готовую ИКК, тем самым, расширяя область применения рассмотренного решения.

В качестве силового элемента предложен линейный моментный двигатель новой конструкции, эскиз магнитной системы которого изображен на рис. 3. Двигатель имеет цилиндрическое исполнение и содержит неподвижный статор 1, имеющий три явно выраженных зубца и два паза, в которые уложены обмотки возбуждения 2. Статор выполнен из магнитомягкого материала. Подвижная часть — ползун состоит из вала 3, выполненного из магнитомягкого материала и жестко закрепленных на нем двух высококоэрцитивных постоянных магнитов 4. Магниты намагничены радиально, направление намагниченности различное. Магнитная цепь устройства содержит два воздушных зазора и стальные участки вала и статора. Принцип действия преобразователя основан на дискретном изменении состояния электромагнитного поля в рабочем зазоре устройства, что достигается соответствующим переключением обмоток возбуждения.

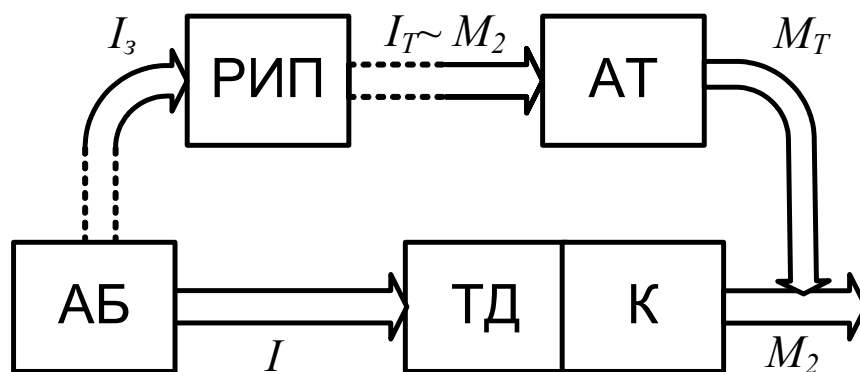


АБ – аккумуляторная батарея, ТД – тяговый двигатель, Р – редуктор, К – колесо,
 АТ — аварийный тормоз

а) Функциональная схема редукторного электропривода ИКК



б) Функциональная схема безредукторного электропривода ИКК
 с традиционным аварийным тормозом



РИП — резервный источник питания

в) Функциональная схема безредукторного электропривода ИКК
 с аварийным тормозом новой конструкции

Рис. 2. Функциональные схемы электропривода ИКК

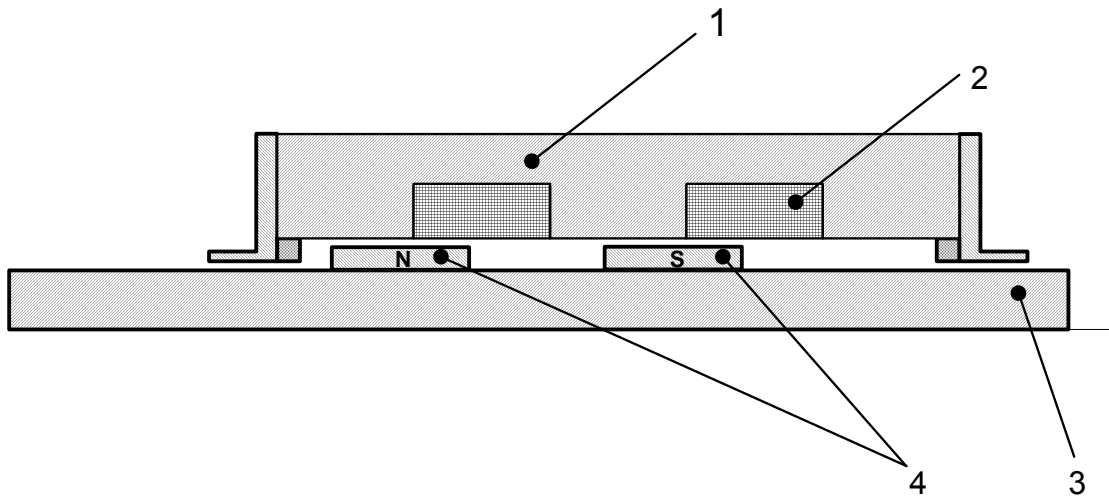


Рис. 3. Эскиз магнитной системы линейного моментного двигателя

По обмоткам протекают токи встречных направлений, обеспечивающие чередующуюся полярность зубцов статора. Одновременное изменение направления токов в обмотках приводит к изменению полярности зубцов статора.

Между постоянным магнитом и зубцом статора противоположной полярности возникают силы притяжения, между магнитом и зубцом одноименной полярности — силы отталкивания. Таким образом, изменение полярности зубцов статора приводит к изменению направления силы, действующей на ползун.

При обесточенных обмотках ползун удерживается неподвижным за счет тангенциальных электромагнитных сил, возникающих между постоянными магнитами и явно выраженными зубцами статора. При этом возможно два граничных положения ползуна: ось левого магнита совпадает с осью крайнего левого зубца статора или ось правого магнита совпадает с осью крайнего правого зубца статора.

Особенностью предложенного двигателя является сравнительно большое значение усилия, развиваемого при обесточенном статоре. В электрических машинах обычной конструкции это усилие является паразитным, и его стремятся уменьшить, соответствующим образом выбирая геометрию магнитной системы. В нашем случае реактивное усилие обеспечивает удержание ползуна в нужном положении при обесточенных обмотках и является полезным.

Период изменения реактивного усилия в два раза короче периода основного усилия, поэтому на половине зубцового деления усилие двигателя определяется суммой реактивного и основного усилия, а на другой половине — их разностью. В результате суммарное усилие существенно зависит от положения ползуна и является несинусоидальной функцией его координаты.

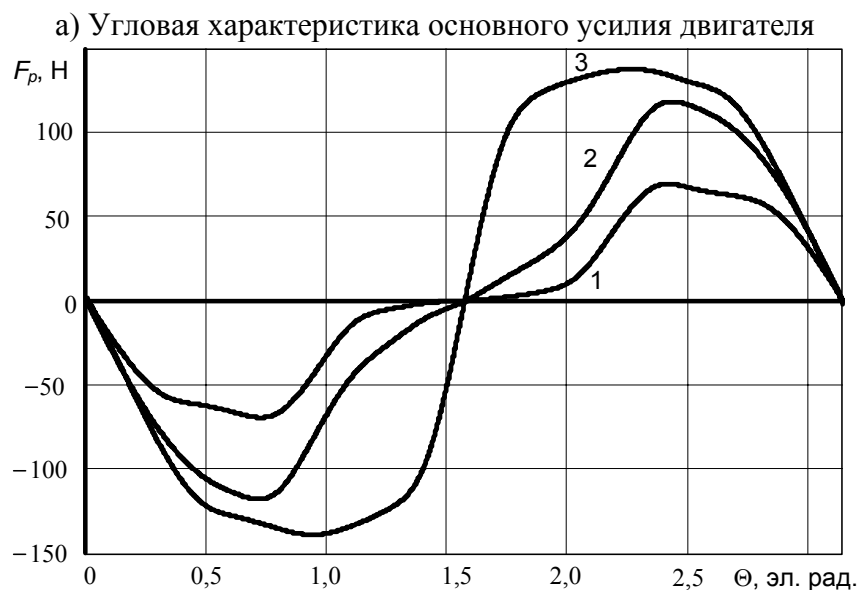
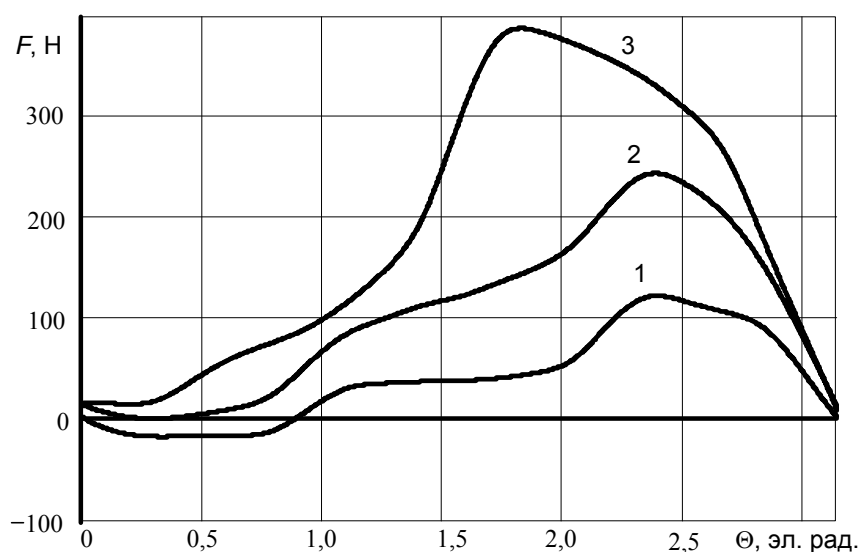
Для исследования предложенного электромеханического преобразователя построена его параметрическая полевая модель, позволяющая рассчитывать двигатели с различной геометрией. На рис. 4 представлены угловые характеристики двигателя, снятые на его полевой модели при различных сочетаниях параметров магнитной системы.

Для синтеза конструкции полевая модель двигателя была преобразована к виду, удобному для оптимизации. Опыты, проведенные методом планирования

эксперимента на полевой модели устройства, позволили получить зависимости между показателями и параметрами электрической машины в виде полиномов. Было показано, что независимыми переменными проектирования являются длина воздушного зазора δ , высота магнита h_m , длина магнита l_m и глубина паза статора h_p . В качестве критерия оптимизации выбран коэффициент, наиболее полно отражающий использование объема двигателя:

$$k_u = \frac{F^{\max}(h_m, l_m, h_p, \delta)}{\sqrt{P(h_m, l_m, h_p, \delta)}},$$

где F^{\max} — максимальное основное усилие двигателя, P — мощность электрических потерь в двигателе, h_m, l_m — высота и длина магнита, h_p — глубина паза статора, δ — длина воздушного зазора.



б) Угловая характеристика реактивного усилия двигателя

Рис. 4. Угловые характеристики двигателя

Оптимизация конструкции проводилась путем поиска максимума функции $K_u(h_m, l_m, h_p, \delta)$ методом сопряженных градиентов. В качестве границ области поиска были использованы технологические ограничения на размеры деталей конструкции и результаты предварительных экспериментов. Значения максимального основного и реактивного усилий в данном случае использовались также в качестве ограничений. В результате получен ряд оптимальных двигателей с различными максимальными усилиями и установлена связь основных размеров машины с требуемым тормозным усилием (рис. 5).

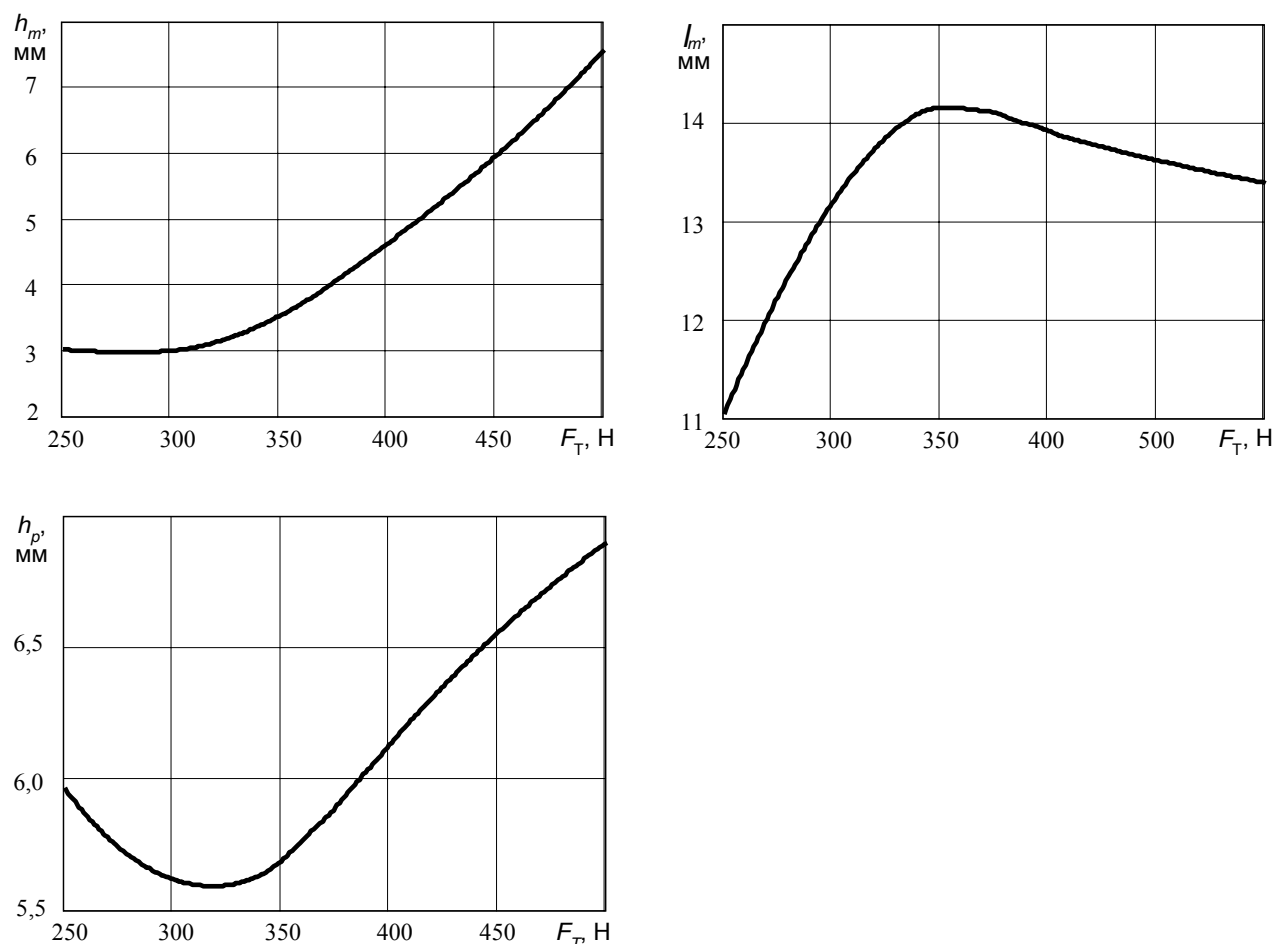


Рис. 5. Оптимальные размеры аварийного тормоза в зависимости от развиваемого усилия

Для управления разработанным устройством предложено использовать стартстопный режим с последующей подачей фиксирующего импульса. Данный алгоритм позволяет при максимальном быстродействии обеспечить плавное торможение, избежав ударов тормозной колодки о шину колеса и, следовательно, колебаний ползуна и рывков при торможении ИКК.

Зависимость усилия двигателя от положения ползуна существенно отличается от синусоидальной, что затрудняет синтез законов управления двигателем. Для решения указанной проблемы получена зависимость усилия двигателя от тока статора при любом положении ползуна:

$$F = f(h_m, l_m, h_p, \delta, \Theta, I).$$

Для этого методом планирования эксперимента определены угловые характеристики двигателя, т.е. зависимости вида

$$F^{max}(h_m, l_m, h_p, \delta, \Theta), F_p^{max}(h_m, l_m, h_p, \delta, \Theta),$$

где Θ — координата положения ползуна, выраженная в электрических радианах. Полученные кривые были разложены в тригонометрические ряды вида

$$As_k = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m F(a_i) \sin(ka_i),$$

$$Aps_k = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m Fp(a_i) \sin(ka_i)$$

В результате анализа гармонического состава кривых усилий установлено, что реактивному усилию соответствуют четные гармоники в кривой результирующего усилия. Нечетные гармоники обусловлены возбуждением статора. Таким образом, от тока зависят только нечетные гармоники, причем, при инженерных расчетах можно учитывать изменение только первой гармоники усилия, изменения остальных гармоник, вследствие их малости слабо влияют на величину результирующего усилия. По результатам экспериментов установлена зависимость амплитуды первой гармоники усилия от тока статора. Данная зависимость была аппроксимирована квадратичным полиномом, в результате получено выражение для расчета усилия рассматриваемого двигателя при любом токе статора и при любом положении ползуна:

$$F(\Theta) = F_T' K_T^T W I \sin(\Theta) + G b_{A_2^F} \sin(2\Theta) + \dots + G b_{A_6^F} \sin(6\Theta),$$

где $F_T' = (F_{\max}^0 \quad F_{\max}^1 \quad F_{\max}^2)$, F_{\max} — максимальное усилие двигателя при номинальном токе; K_T^T — матрица-столбец, содержащая коэффициенты полученного полинома;

$$G = (1 \quad h_m \quad l_m \quad h_p \quad \delta \quad h_m^2 \quad l_m^2 \quad h_p^2 \quad \delta \quad h_m l_m \quad h_m h_p \quad h_m \delta \quad l_m h_p \quad l_m \delta \quad h_p \delta),$$

G — матрица геометрических параметров двигателя, b — коэффициенты полиномов для амплитуд соответствующих гармоник. Полученная зависимость связывает ток статора с усилием развиваемым двигателем и позволяет синтезировать законы управления аварийным тормозом.

По результатам исследования сформулированы рекомендации для инженерного проектирования устройств аварийного торможения ИКК.

Разработанная методика включает следующие этапы:

1) расчет необходимых тормозных усилий исходя из параметров ИКК и режимов ее движения;

2) определение конфигурации магнитной системы тормоза. Рекомендации по выбору основных размеров устройства приведены в виде кривых и коэффициентов полиномов, связывающих параметры машины с ее показателями;

3) расчет магнитной системы двигателя, заключающийся в определении сечений участков магнитной цепи;

4) определение электрических параметров двигателя, включающий расчет обмоточных данных, номинальных токов и сопротивлений обмоток;

5) определение желаемого закона изменения тока в обмотках двигателя;

6) расчет основных показателей спроектированного двигателя. При необходимости принятие решения об изменении конструкции и повторении расчета.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований и примеры практической реализации тормозных устройств для ИКК с электроприводом.

Приводится функциональная схема разработанной системы аварийного торможения, произведен расчет электромагнитного тормоза и выбран аварийный источник питания.

По результатам экспериментальных исследований сделаны следующие выводы:

Эксперименты показали эффективность применения разработанной системы для аварийного торможения ИКК. Произведено сравнение энергопотребления традиционного и нового аварийного тормоза. Энергопотребление новой тормозной системы составило 0,52 Вт·ч на один цикл срабатывания-растормаживания при условии однократного срабатывания в течение часа. Для традиционной системы этот показатель находится на уровне 30–40 Вт·ч.

Масса новой тормозной системы составила около 7,5 кг, в то время как масса двух электромагнитных тормоза традиционной конструкции около 10 кг.

Алгоритм управления тормозом обеспечивает плавное торможение без рывков, колебаний тормозной колодки при включении тормоза не происходит

Основные показатели процесса торможения находятся в пределах установленных нормативными документами и соответствуют требованиям заказчика.

На базе предложенных принципов и конструкций создана аварийная тормозная система для ИКК с электроприводом БК–35 серийно выпускаемой ОАО «Уфимский завод металлических и пластмассовых изделий».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение проблемы обеспечения безопасности движения ИКК с безредукторным электроприводом. Предложено ввести в состав электропривода систему аварийного торможения новой конструкции, обеспечивающей минимальное энергопотребление.

В процессе решения задачи:

1) было проанализировано движение ИКК в режиме торможения и выявлены условия безопасного торможения, указаны способы управления ИКК при торможении, позволяющие остановить коляску максимально быстро и безопасно. На основании динамического анализа сформулированы требования к тормозным устройствам ИКК;

2) показано, что существующие принципы построения систем аварийного торможения неприменимы в безредукторном приводе из-за высокого энергопотребления;

3) разработаны новые принципы построения, функциональная схема и алгоритмы работы системы аварийного торможения ИКК, позволяющие минимизировать энергопотребление системы и обеспечить безопасность движения в аварийных ситуациях;

4) разработана новая конструкция тормозного устройства, реализующая предложенные принципы;

5) разработана методика проектирования нового тормозного устройства, обеспечивающая его оптимальность по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению;

6) результаты работы были использованы при создании системы аварийного торможения для ИКК БК-35, выпускаемого ОАО «Уфимский завод металлических и пластмассовых изделий» и вошедшего в список ста лучших товаров России в 2005 г. Результаты теоретических исследований приняты к внедрению в учебный процесс ЮУрГУ в курсах «Электрические машины» и «Электрические и электронные аппараты».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Воронин, С.Г. Организация аварийного торможения инвалидной коляски с электроприводом / С.Г. Воронин, А.И. Согрин // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: сборник научных трудов. — Уфа: УГАТУ, 2002. — С. 26–29.

2. Воронин, С.Г. Электропривод инвалидной коляски: принципы построения и проблемы реализации / С.Г. Воронин, Д.В. Коробатов, А.И. Согрин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2001. — вып. 1. — № 4(04). — С. 84–88.

3. Помогаев, Г.В. Применение метода конечных элементов для расчета электромагнитного тормоза инвалидной коляски / Г.В. Помогаев, А.И. Согрин, М.А. Лютов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2005. — вып. 6. — № 9(49). — С. 108–109.

4. Согрин, А.И. Анализ режима аварийного торможения инвалидного кресла-коляски / А.И. Согрин // XXII Российская школы по проблемам науки и технологий: Тезисы докладов. — Миасс: МНУЦ, 2002. — С. 47.

5. Согрин, А.И. Анализ режима аварийного торможения инвалидного кресла-коляски / А.И. Согрин // Механика и процессы управления: Сборник научных трудов. — М: РАН, 2002. — С. 248–256.

6. Согрин, А.И. Способы повышения эффективности аварийной тормозной системы инвалидного кресла-коляски / А.И. Согрин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2004. — вып. 5. — № 4(33). — С. 19–21.

Согрин Андрей Игоревич

СИСТЕМА АВАРИЙНОГО ТОРМОЖЕНИЯ
ИНВАЛИДНОГО КРЕСЛА-КОЛЯСКИ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Специальность 05.09.03 — «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 19.09.2007. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ 336.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск,
пр. им. Ленина, 76.