

Барбашов Николай Николаевич

**УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАХОВИЧНЫХ
АККУМУЛЯТОРОВ ЭНЕРГИИ ПРИВОДА ПОДЪЕМНО-
ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

Специальность

05.05.04 – Строительные, дорожные и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters, likely representing the author's name.

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им.
Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Леонов Игорь Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гулиа Нурбей Владимирович
доктор технических наук, профессор
Гришин Дмитрий Константинович

Ведущее предприятие: Московский государственный
университет путей сообщения.

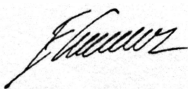
Защита диссертации состоится _____. в ____ часов на заседании диссертационного
совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете им.
Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по
указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Мос
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Доктор технических наук



Сарач Е.Б.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2015680

Барбашов Н. Н. Улучшение ха

~ 570

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи со значительным ростом энергопотребления в РФ правительством были приняты «Основные положения энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2020», в которых в том числе отмечаются необходимость:

- конструирования высокоэффективного энергосберегающего оборудования;
- снижения расхода энергии в промышленности, ЖКХ и на транспорте.

Одной из основных причин роста потребления энергии машинами является их работа на неустановившихся режимах с частым чередованием разгонов и торможений. Так, например, известные конструкции механизмов торможения ряда подъемно-транспортных машин (ПТМ) являются энергозатратными. Вместе с тем, значительные успехи рекуперации энергии торможения достигнуты в транспортных гибридных силовых установках, которые позволяют снижать потери энергии до 50% в зависимости от частоты процессов торможения. На практике в подъемно-транспортных машинах все шире применяются различные типы электрических и маховичных аккумуляторов энергии (фирмы Torotrack, Optare, Allison Transmission, Ricardo, Toyota, Mitsubishi, Komatsu Utility, Proton Motor и многие другие). В Российской Федерации проводились аналогичные исследования подобного типа с маховичным аккумулятором энергии. Данные ряда авторов показывают, что потери энергии торможения, например, одного мостового крана грузоподъемностью 20т за смену достигает величины порядка 10000 кДж, что сопоставимо с полезными затратами энергии.

Значительное улучшение технико-экономических показателей подъемно-транспортных машин можно осуществить, как правило, на ранней стадии проектирования при выборе передаточных отношений механизма трансмиссии, зависящих от мощности и скорости двигателя и требуемых динамических и экономических показателей. Поэтому особую важность приобретает решение вопроса о рациональном выборе мощности двигателя. Встает также вопрос о выборе передаточного отношения редуктора или о рациональном законе изменения передаточного отношения вариатора, соединяющего двигатель и исполнительный механизм, при рекуперации энергии торможения. Вот почему на протяжении длительного времени продолжают научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области совершенствования конструкций вариаторов, согласующих в широком диапазоне скоростей и нагрузок, характеристики двигателей и рабочих органов подъемно-транспортных машин.

Для решения поставленной актуальной задачи в первую очередь необходимо разработать теоретические основы возможных методов снижения расхода энергии подъемно-транспортных машин на неустановившихся режимах работы. В качестве метода исследования в диссертации используются идеализированные неустановившиеся режимы работы «разгон - торможение», в которых не рассматривается влияние на расход энергии малосущественных факторов.

В подъемно-транспортных машинах (кранах, погрузчиках, подъемниках для автомобильных паркингов и др.) возможно применение различных схем маховичных и электрических аккумуляторов энергии. В диссертационной работе решается задача управления – управления маховичным аккумулятором энергии. Целесообразность его применения в подъемно-транспортных машинах с приводом определяется высоким КПД преобразования потока энергии в маховичных аккумуляторах. Способом управления маховичным аккумулятором является изменение передаточного отношения его привода. Теоретическая часть способа управления изменением передаточного отношения для рекуперации энергии торможения подъемно-транспортных транспортных машин до настоящего времени была разработана недостаточно полно, поэтому в настоящей работе этому вопросу было уделено особое внимание.

Цель работы заключается в разработке способов повышения эксплуатационной эффективности подъемно – транспортных машин с рекуперацией энергии торможения маховичными аккумуляторами энергии на основе методов проектирования передаточных механизмов по показателям экономичности расхода энергии.

Достижение указанной цели работы осуществляется постановкой и решением следующих задач:

1. Анализ существующих способов повышения эффективности работы машин на неустановившихся режимах работы;
2. Разработка методов расчета КПД привода машин и механизмов на неустановившихся режимах работы;
3. Установление теоретической связи основных экономических показателей подъемно-транспортных машин с гибридными силовыми установками с кинематическими характеристиками передаточных механизмов маховичных аккумуляторов энергии;
4. Установление связи КПД рекуперации энергии торможения в границах изменения

- передаточного отношения вариаторов привода маховичного аккумулятора энергии;
5. Разработка математических моделей процесса рекуперации кинетической энергии торможения в маховичный аккумулятор с целью повышения КПД и быстродействия привода подъемно-транспортных машин.
 6. Определение зависимостей изменения кинематических параметров зубчатых механизмов привода подъемно-транспортной машины по критерию экономичности расхода энергии;
 7. Экспериментальное подтверждение теоретических зависимостей на макете установки, моделирующей изменения передаточной функции в процессе разгона и торможения.

Методы исследования. В работе использовались известные методы исследования динамики машин, кинематического и динамического исследования механизмов, методы компьютерного моделирования, аппроксимации функций и идеализации режимов работы.

Научная новизна:

В работе исследуются новый механизм привода, защищенный патентом (патент РФ «Устройство рекуперации энергии торможения машины», № 2438884, 12.03.2010), позволяющий осуществить экономию энергии, повысить быстродействие и КПД. На базе этих исследований:

- а) разработаны математические модели двухмассной системы с изменением передаточного отношения процесса рекуперации энергии в приводах подъемно-транспортных машин с изменяемой передаточной функцией механизма;
- б) обоснован и предложен перспективный способ полной рекуперации энергии торможения, обеспечивающий постоянство суммарного значения кинетической энергии машинного агрегата с маховичным накопителем энергии;
- в) установлена теоретическая связь основных экономических показателей рекуперации энергии с ограничением кинематических характеристик передаточного механизма привода маховичного аккумулятора.
- г) разработаны программы для исследования энергетической модели, которые могут быть использованы для выбора мощности основного и разгонных двигателей машины и для оценки экономической эффективности устройств рекуперации энергии.

Практическое значение результатов работы:

Разработанные методы расчетов устройств с рекуперацией механической энергии торможения позволяют на стадии проектирования оценить экономические показатели и КПД привода в неустановившихся режимах работы и позволяют повысить точность расчетов и ускорить процесс проектирования подъемно-транспортных машин. Разработаны программы для ЭВМ исследования экономической эффективности устройств рекуперации энергии, анализ расчетов по которым был использован при выполнении научно-исследовательских работ в 2009 и 2010 гг.

Достоверность основных научных положений, выводов и рекомендаций обоснована соответствующими доказательствами, базирующимися на фундаментальных законах механики, результатами реального и вычислительного эксперимента, сравнительным анализом полученных технических решений с решениями других авторов.

Апробация работы производилась в докладах на Всероссийском научном семинаре факультета «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана по автоматическому управлению установок тепловых энергетических установок в 2008-2009 гг, научном семинаре ИМАШ РАН имени А.А. Благодина в 2011, а также на научно-методических семинарах кафедр «Теория механизмов и машин» и «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2009 - 2012 гг.

Реализация работы: Результаты теоретических исследований были приняты к использованию в ЗАО «НПГ ПАРСЕК» и в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ, получен патент: «Устройство рекуперации энергии торможения машины», № 2438884, 12.03.2010.

Объем диссертации. Диссертация содержит 153 страницы машинописного текста, 44 иллюстрации, 4 таблицы и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы, включающего 111 наименований.

В первой главе представлен обзор исследований и конструкций приводов гибридных силовых установок, выполненных отечественными (Н.В. Гулиа, И.Д. Юдовским, Г.О. Котиевым, А.Ф. Крайневым, В.И. Крутовым, Н.К. Куликовым, И.В. Леоновым), и зарубежными учеными (Miyao Takayuki, Nasdal Roland, Heinzel Markus, Steinhart Heinrich) и др. Дополнительно можно отметить работы А.А. Смехова, Н.И. Ерофеева, А.А. Зарецкого, Н.И. Портного, А.В. Ерейского, в которых показана возможность улучшения процесса торможения при условии применения управляемых тормозных систем подъемно-транспортных машин.

Вторая глава посвящена энергетическому анализу основных фактов, определяющих экономическую эффективность работы подъемно-транспортных машин с помощью математической энергетической модели.

Расход энергии (топлива) в подъемно-транспортных и транспортных машинах значительно возрастает при их работе на неуставившихся режимах.

На установившихся режимах существует однозначная обратно пропорциональная зависимость между удельным расходом энергии и КПД. Поэтому целесообразно использовать аналогичную методику расчёта КПД и на неуставившихся режимах работы. Профессором Леоновым И.В. для оценки и экономических и динамических качеств подъемно-транспортных машин была предложена комбинация неуставившихся режимов разгона и торможения, которая показана на рисунке 1.

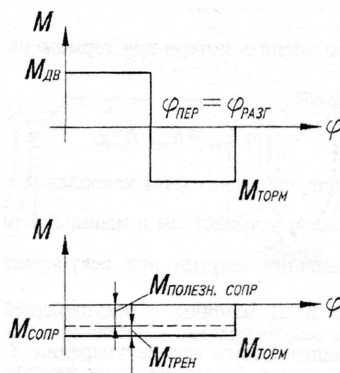


Рисунок 1. Изменение составляющих суммарного приведенного момента в идеализированном цикле «разгон – торможение»

Идеализация этой комбинации двух циклов неустановившегося движения состоит в допущении мгновенности изменения нагрузки и постоянного значения приведенных моментов на отдельных участках разгона и торможения. Использование для расчетов понятия идеализированного цикла «разгон – торможение» не исключает возможности оценки подъемно-транспортных машин при других реальных видах нагружения, но имеет следующие преимущества:

а) Позволяет оценить экстремальные динамические качества и производить сравнение вариантов машин при одинаковых максимальных динамических нагрузках;

б) Позволяет произвести расчеты динамичности машин и экономичности расхода энергии при изменении многочисленных конструктивных параметров на стадии проектирования при одинаковых условиях нагружения для всех вариантов;

в) Дает возможность прогнозирования эксплуатационной экономичности машин на ранней стадии проектирования при рассмотрении различных вариантов нагружения.

Уравнение баланса работ за цикл справедливо не только на установившемся режиме движения, но применимо и к некоторым видам неустановившегося движения, например, циклу движения «разгон – торможение». Поскольку суммарная работа в цикле «разгон – торможение» и изменение кинетической энергии равны нулю, то принятая ранее для установившихся режимов оценка экономичности в виде КПД безусловно применима и при таком виде неустановившегося движения.

Общий КПД в цикле «разгон-торможение» можно представить в виде произведения механического КПД $\eta_{\text{мех}}$, отражающего потери на трение, и КПД цикла $\eta_{\text{цикла}}$, позволяющего оценить потери при торможении машины в зависимости от изменения нагрузки в цикле.

$$\eta_{\text{общий}} = \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{цикла}}$$

Под рекуперацией энергии понимается накопление кинетической энергии при торможении аккумулирующим устройством и использование её в процессе разгона. Так как работу по накоплению энергии при рекуперации $A_{\text{рек}}$ можно признать «полезной», то цикловой КПД машины с рекуперацией «энергии торможения» увеличивается на долю реализованной при рекуперации $d_{\text{рек}}$ кинетической энергии машины:

где $d_{\text{потерь}} = d_{\text{трения}} + d_{\text{ин}}$ - доля потерь на трение и кинетических потерь при торможении;

$$d_{\text{рек}} = \frac{(A_{\text{акл}})_{\text{цикл}}}{(A_{\text{дв}})_{\text{цикл}}} - \text{доля работы, аккумулированная в цикле «разгон-торможение»};$$

$A_{\text{акл}}$ - величина рекуперированной энергии;

$(A_{\text{дв}})_{\text{цикл}}$ - затраченная в цикле работа двигателя;

$d_{\text{ин}}$ - доля работ сил инерции.

Третья глава посвящена вопросам теоретического исследования показателей подъемно-транспортных машин с рекуперацией энергии.

Как показали исследования, рекуперация энергии торможения и накопление её в маховике может осуществляться путём изменения передаточного отношения вариатора, связывающего маховик с рабочим органом машины. Так как действующие в процессе торможения ускорения и динамические нагрузки превышают в десятки раз значения аналогичных параметров в процессе разгона, то был сделан выбор оптимального закона управления передаточным отношением вариатора при торможении с рекуперацией энергии. До настоящего времени теоретически эта задача не была решена, несмотря на успешно выполненные экспериментальные исследования профессором Н.В. Гулиа, которые проводились с изменением передаточного отношения. Нами была использована структурная и математическая модели подъемно-транспортной машины с маховичным аккумулятором энергии, управляемым вариатором с переменным передаточным отношением (рисунок 2).

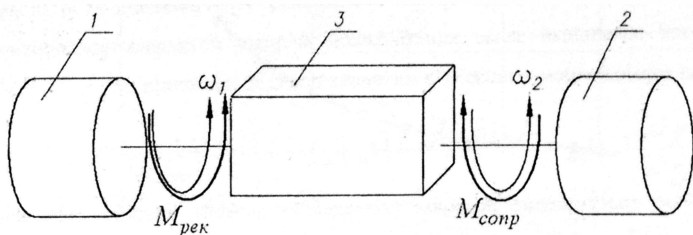


Рисунок 2. Схема машины с маховичным аккумулятором энергии: 1 – маховик; 2 – рабочий орган машины; 3 – вариатор

Следует отметить, что эта модель, построенная на анализе изменения кинетической энергии, отражает энергетические свойства только одной кинематической цепи привода маховика с помощью вариатора скоростей от рабочего органа машины.

Наименьшие кинетические потери (часть кинетической энергии не может быть рекуперирована в виду конструктивных ограничений вариатора) наблюдаются тогда, когда вся теряемая при торможении кинетическая энергия машины переводится в маховик. Другими словами закон изменения передаточного отношения вариатора будет рациональным, если кинетические потери равны нулю и суммарный запас кинетической энергии при торможении машины с рекуперацией энергии имеет постоянное значение

$$T_{\Sigma} = T_{\text{мах}} + T_{\text{мр}} = \text{const} \quad (1)$$

где $T_{\text{мах}} = \frac{J_{\text{мах}} (\omega_{\text{мах}})^2}{2}$ – кинетическая энергия маховика;

$T_{\text{мр}} = \frac{J_{\text{мр}} (\omega_{\text{мр}})^2}{2}$ – кинетическая энергия привода машины;

$\omega_2 = \omega_{\text{мр}}$, $\omega_{\text{мах}} = \omega_1$ – текущие значения угловых скоростей приводного вала и маховика;

$J_1 = J_{\text{мах}}$, $J_{\text{мр}} = J_2$ – моменты инерции маховика и машины.

Уравнение (1) позволяет решить две задачи:

1) Определить необходимый момент инерции маховика при выбранных максимальных скоростях рабочего органа и маховика. При решении этой задачи приравниваются начальный запас кинетической энергии подъемно-транспортной машины перед торможением и запас её в маховике после торможения

$$(T_{\text{мах}})_{\text{max}} = \frac{J_{\text{мах}} (\omega_{\text{мах}})_{\text{max}}^2}{2} = (T_{\text{мр}})_{\text{max}} = \frac{J_{\text{мр}} (\omega_{\text{мр}})_{\text{max}}^2}{2}.$$

Последнее соотношение позволяет определить момент инерции маховика $J_{\text{мах}}$, необходимый для полного использования кинетической энергии, при известном приведенном к трансмиссии моменте инерции машины $J_{\text{мр}}$

$$\frac{J_{\text{мр}}}{J_{\text{мах}}} = \left[\frac{(\omega_{\text{мах}})_{\text{max}}}{(\omega_{\text{мр}})_{\text{max}}} \right]^2 \quad (2)$$

2) Определить необходимый для полного сохранения энергии закон изменения скорости маховика при торможении подъемно-транспортной машины с учётом полученного необходимого соотношения моментов инерции (2), который ищется по уравнению (1)

$$\frac{\omega_{\max}}{(\omega_{\max})_{\max}} = \sqrt{1 - \left[\frac{\omega_{np}}{(\omega_{np})_{\max}} \right]^2} \quad (3)$$

Анализ уравнения (3) позволяет получить рациональную аналитическую зависимость закона изменения передаточного отношения вариатора с соотношением моментов инерции по выражению (2)

$$U_{12}(\omega_{np}) = K_{var} \sqrt{\left[\frac{(\omega_{np})_{\max}}{\omega_{np}} \right]^2 - 1}, \quad (4)$$

которая представлена на рисунке 3 в функции отношения максимальной и текущей скорости $\frac{(\omega_{np})_{\max}}{\omega_{np}}$ трансмиссии машины при торможении с полной рекуперацией

энергии, где $K_{var} = \frac{\omega_{1\max}}{\omega_{2\max}}$ - коэффициент, характеризующий переходный процесс в вариаторе.

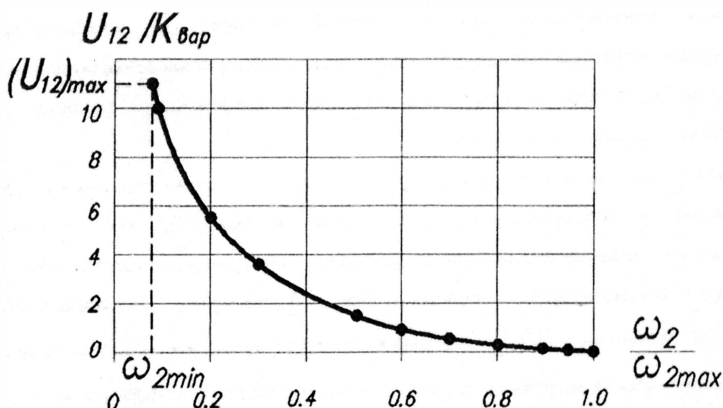


Рисунок 3. Зависимость безразмерной передаточной функции вариатора от скорости машины для обеспечения постоянного значения кинетической энергии системы

Проведенный анализ выявил некоторые свойства предложенного закона изменения передаточного отношения (4) при торможении машины:

а) Предложенный закон изменения передаточного отношения не зависит от действующих сил (моментов сил), а определяется только изменением скорости машины ω_{np} . Поэтому вариатор может быть подключён к системе автоматического регулирования скорости машины без использования импульса по нагрузке. В виду простоты включения маховичного аккумулятора в систему автоматического регулирования скорости машины и по причине его надёжности применение его становится предпочтительнее электрического аккумулятора энергии;

б) Время торможения определяется отклонением от предложенного закона изменения передаточного отношения и от суммарного приведенного момента сил движущих и сопротивления M_{Σ} , определяющего ускорение машины. Опубликованных в литературе данных о снижении динамических качеств подъемно-транспортных машин при применении маховичного аккумулятора энергии торможения нет. Снижения динамических качеств машины не было выявлено и при экспериментальных исследованиях Н.В. Гулиа. Действие маховичного аккумулятора энергии при изменении передаточного отношения кардинально отличается от действия обычного маховика, напрямую связанного с ДВС, увеличение момента инерции которого снижает колебания на установившемся режиме движения и затягивает процесс разгона. Поэтому в диссертации не проводилось отдельных исследований динамических качеств силовых установок с маховичными аккумуляторами энергии, а основное внимание было уделено исследованию влияния характеристик вариатора, связывающего маховик с трансмиссией машины, на экономическую эффективность машин.

в) Поскольку все известные вариаторы скоростей имеют ограничения по максимальному и минимальному передаточному отношению, то это будет сказываться на экономических характеристиках передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии. При ограниченном максимальном передаточном отношении $(U_{12})_{\max}$ (рисунок 3) будет прекращаться дальнейшая перекачка кинетической энергии из трансмиссии в маховик при торможении машины ниже некоторой скорости трансмиссии машины

$$(\omega_2)_{\min} = \frac{(\omega_1)_{\max}}{(U_{12})_{\max}}.$$

Полная остановка подъемно-транспортной машины в заданном положении должна обеспечиваться обычной тормозной системой с некоторыми кинетическими потерями энергии.

Полная остановка подъемно-транспортной машины в заданном положении должна обеспечиваться обычной тормозной системой с некоторыми кинетическими потерями энергии.

Таким образом, определённая часть кинетической энергии торможения не сможет быть рекуперирована механическим устройством. Это вызывает появление кинетических потерь, где долей потерь энергии можно выразить:

$$d_{\text{потерь}} = \left[\frac{(\omega_2)_{\min}}{(\omega_2)_{\max}} \right]^2$$

и ограничение КПД процесса рекуперации энергии достаточно высокой величиной в зависимости, представленной на рисунке 4, от ограничений передаточного отношения вариатора

$$\eta_{\text{рек}} = 1 - \chi_{\text{цикла}} = \frac{(\omega_2)_{\max}^2 - (\omega_2)_{\min}^2}{(\omega_2)_{\max}^2} = \frac{[(\omega_2)_{\max} + (\omega_2)_{\min}] \cdot [(\omega_2)_{\max} - (\omega_2)_{\min}]}{(\omega_2)_{\max}^2}$$

$$\eta_{\text{рек}} = \frac{2(\omega_2)_{\text{cp}} \cdot D_{\max}}{(\omega_2)_{\max}^2}$$

где $D_{\max} = (\omega_2)_{\max} - (\omega_2)_{\min}$ - диапазон изменения скорости машины при рекуперации

$(\omega_2)_{\text{cp}} = \frac{(\omega_2)_{\max} + (\omega_2)_{\min}}{2}$ - средняя скорость в диапазоне рекуперации

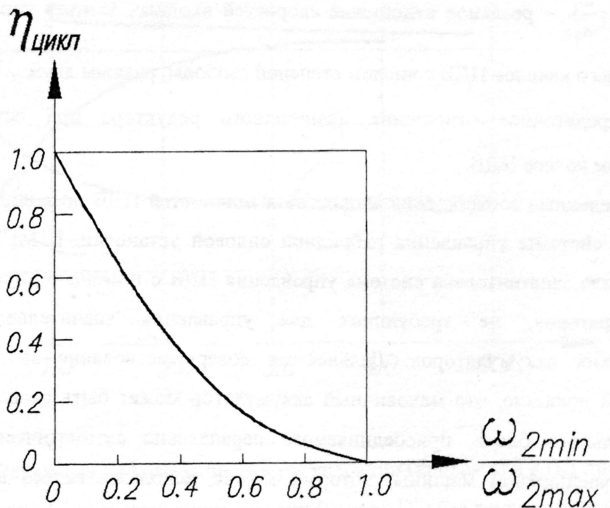


Рисунок 4. Влияние ограничений минимальной и максимальной скоростей вариатора на КПД цикла рекуперации подъемно-транспортной машины

В четвертой главе оценивается возможность применения планетарных дифференциальных вариаторов (ПДВ) для изменения передаточного отношения кинематической цепи управления маховичным аккумулятором. На возможность применения дифференциального планетарного механизма для управления рекуперации энергии маховичным аккумулятором впервые указал профессор Н.К. Куликов, в США созданы и испытаны такие реальные системы управления электромобилем с маховичным аккумулятором энергии. Вопросы выбора диапазона изменения передаточного отношения ПДВ достаточно полно освещены в работе А.В. Ерейского «К вопросу динамики энергонакопительного торможения тележки мостового крана» и учебнике Н.И. Левитского «Теория механизмов и машин». Поэтому в диссертации не ставилась цель экспериментального исследования ПДВ.

Естественно, что возможность использования ПДВ в качестве вариатора привода маховичного аккумулятора связана с расчетами потребной мощности на управление передаточного отношения. Уравнение мощностей в зацеплениях центральных колес с сателлитом ПДВ, принимая мощность на водиле $W_4 = W_3 + W_1$ за суммарную, было получено в виде соотношения отношения мощностей

$$\frac{W_3}{W_1} = \frac{U_{41}}{U_{41}^{(3)}} - 1$$

где $U_{41} = \frac{\omega_4}{\omega_1}$ – реальное отношение скоростей входных звеньев управляемого и управляющего каналов ПДВ с числом степеней свободы, равным двум.

$U_{41}^{(3)}$ – передаточное отношение планетарного редуктора при остановленном центральном колесе ПДВ.

Выведенные соотношения скоростей и мощностей ПДВ позволили перейти к разработке системы управления гибридной силовой установки. В МГТУ им. Н.Э. Баумана была запатентована система управления ПДВ с помощью двух обратимых мотор-генераторов, не требующих для управления значительной ёмкости электрических аккумуляторов. Дальнейшее совершенствование запатентованной схемы ПДВ показало, что маховичный аккумулятор может быть сконструирован в виде отдельного блока, присоединяемого параллельно автоматической коробке передач транспортной машины, который можно использовать без включения в систему управления, используя свойство самовыравнивания кинетических энергий звеньев ПДВ.

Пятая глава посвящена моделированию на ЭВМ динамических и экономических характеристик силовой установки с рекуперацией энергии торможения в маховичном аккумуляторе и экспериментальному исследованию механизма управления маховичного аккумулятора энергии.

Моделирование экономических показателей в идеализированном цикле «разгон – торможение» (рисунок 5) было проведено на примере транспортной машины с гибридным приводом с использованием разработанной методики динамического расчета.

Путем моделирования на ЭВМ был проведен расчёт коэффициента рекуперации при варьировании коэффициента $k_{\text{торм}} = \frac{M_{\text{торм}}}{M_{\text{дв}}}$, представляющего отношение мощностей или моментов рекупирующих устройств и основного двигателя. При этом была выявлена зависимость КПД неуставившегося цикла «разгон – торможение» (рисунок 5) от выбранного режима торможения, определяемого вариацией коэффициента $k_{\text{торм}}$.

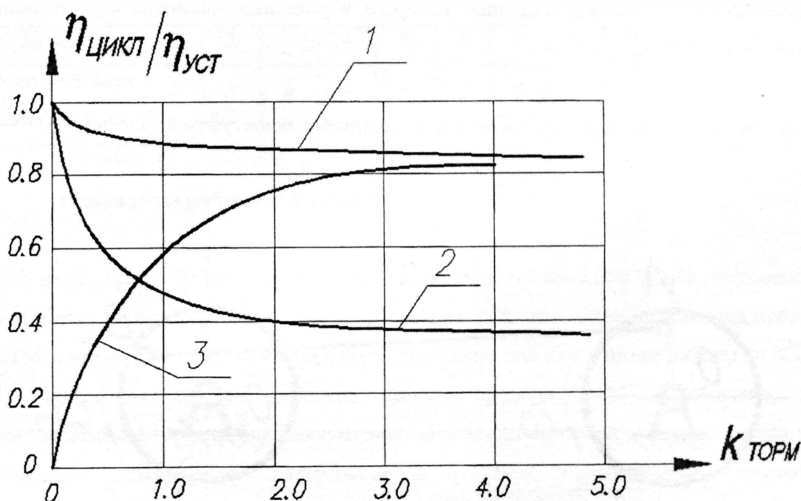


Рисунок 5 Зависимости коэффициента рекуперации (кривая 3) и КПД цикла «разгон – торможение» при рекуперации энергии (кривая 1) и без рекуперации (кривая 2)

В реальном комбинированном режиме необходимо учесть как цикловой КПД $\eta_{\text{разг-торм}}^{\text{цикл}}$, характеризующий потери энергии при торможении, так и долю времени $\nu_{\text{цикл}}$ работы на неустановившемся режиме по сравнению с установившимся режимом

$$\eta_{\text{общ}} = (\nu_{\text{уст}} \eta_{\text{уст}} + \nu_{\text{разг-торм}}^{\text{цикл}} \eta_{\text{разг-торм}}^{\text{цикл}}) \eta_{\text{мех}}$$

где $\nu_{\text{уст}} = \frac{\tau_{\text{уст}}}{\tau_{\text{общ}}}$; $\nu_{\text{разг-торм}}^{\text{цикл}} = \frac{\tau_{\text{разг}} + \tau_{\text{торм}}}{\tau_{\text{общ}}}$ – доли продолжительности работы на установившемся и неустановившемся режимах в общем времени движения $\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{разг}} + \tau_{\text{торм}} + \tau_{\text{уст}}$.

После теоретического выявления зависимости передаточного отношения (4) в цикле «разгон-торможение» для полной рекуперации энергии торможения подъемно-транспортной машины потребовалось экспериментальное подтверждение этой зависимости. Эксперименты проводились на простой физической модели, в которой удалось исключить влияние характеристики двигателя на зависимость рационального передаточного отношения, влиянием которого в реальных машинах, естественно, пренебрегать нельзя.

Механизм состоит из двух маховиков 1 и 2, соединенных шатуном 3 (рисунок 6).

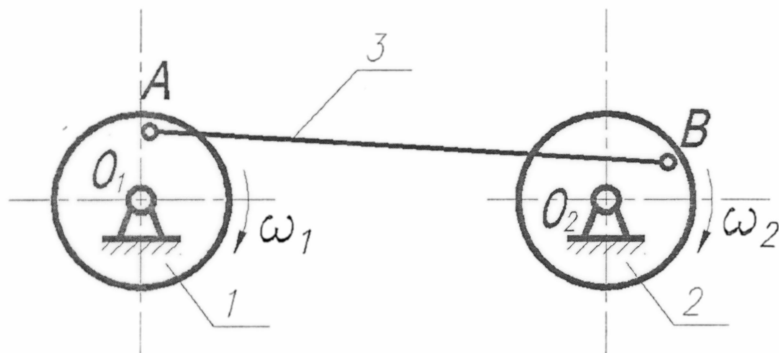


Рисунок 6. Схема четырехшарнирного механизма с рекуперацией энергии: 1, 2 – маховики, 3 – шатун

Измерение угла поворота маховика (коромысла четырехшарнирного механизма) в эксперименте осуществлялось путем обработки на ЭВМ скоростной видеосъемки процесса движения механизма с помощью программ Microsoft Windows Movie Maker 5.1 и AutoCAD 2006. Построение графиков выполнялось с помощью системы Microsoft Excel 2003, все дальнейшие операции по обработке эксперимента производились в системе MathCAD. Передаточное отношение механизма определялось путем дифференцирования одного угла поворота маховика по другому углу, то есть

$$U_{12} = \frac{d\varphi_1}{d\varphi_2}$$

Затем полученный расчетно-экспериментальным путем закон изменения передаточного отношения по углу поворота коромысла механизма сравнивался с расчетным передаточным отношением.

В таблице 1 приведена ошибка в %.

Таблица 1.

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
относительная ошибка δ , %	2	3	4	5	3	2	0	3	4	5	4	2

Результаты работы и выводы

- 1) В диссертационной работе дано решение научно-технической задачи, состоящей в разработке и обосновании метода рекуперативного торможения механизмов привода ПТМ, способствующего уменьшению общих затрат энергии в цикле работы до 20%.
- 2) На основе анализа режимов работы привода ПТМ установлено, что рекуперативное торможение с аккумулярованием кинетической энергии в маховике с помощью планетарного дифференциала является перспективным способом повышения эффективности его работы.
- 3) Показано, что способ рекуперативного торможения механизмов с управляемым приводом планетарного дифференциала с изменением передаточной функции по гиперболической зависимости, предложенный в работе, позволяет сохранять кинетическую энергию в маховичном накопителе и использовать ее в дальнейшем при разгоне.

- 4) На основании анализа разработанной двухмассной динамической модели с управляемым планетарным вариатором по полученному закону передаточного отношения определена зависимость КПД привода машины в границах изменения передаточного отношения вариатора привода.
- 5) Расчетным и экспериментальным путем доказана эффективность найденной передаточной функции для обеспечения постоянного значения кинетической энергии привода ПТМ с маховичным аккумулятором.
- 6) Результаты работы внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана путем издания учебного пособия по выполнению курсового проекта по дисциплине «Основы проектирования машин».

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных трудах:

- 1) Патент № 2438884 (РФ). Устройство рекуперации энергии торможения машины/ Барбашов Н.Н., Леонов И.В. //Б. И. 2012. № 1.
- 2) Барбашов Н.Н. Модель машины с маховичным аккумулятором энергии //Теория механизмов и машин. 2010. №2., том 8. Изд-во СПбГПУ. С. 22-29.
- 3) Барбашов Н.Н., Леонов Д.И., Леонов И.В. Основы проектирования машин по динамическим и экономическим показателям //Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. №9. С. 45-50.
- 4) Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Энергетическая модель передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. №4. С. 61 – 69.
- 5) Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Улучшение механических характеристик механизмов привода маховичных аккумуляторов энергии //Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №11. С. 24 – 27.
- 6) Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Улучшение энергетических характеристик подъемно-транспортных машин //Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Специальный выпуск. Фундаментальные проблемы создания и поддержки высокотехнологичных производств. 2012г. С. 57 – 66.