



Нейман Владимир Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ТОЭ Новосибирского государственного технического университета. Значительных научных успехов добился в области анализа и моделирования процессов энергопреобразования в электромеханике.



Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета. Основные виды научной деятельности – фундаментальные и прикладные научные исследования в области электромеханики – связаны с теорией и практикой импульсных электромагнитных машин ударного действия.

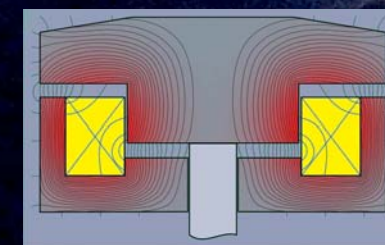
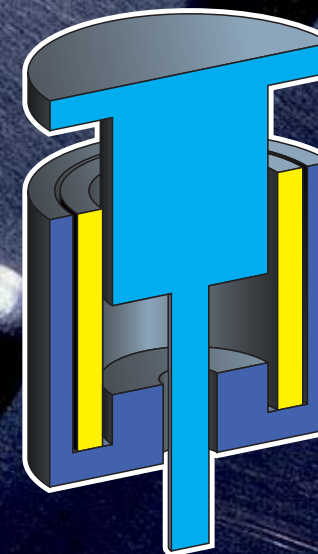


Мошкин Владимир Иванович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета. Научные интересы лежат в области теории и практики процессов энергопреобразования в электромагнитных двигателях, используемых в импульсных технологиях.

В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров

ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Монография



ISBN 978-5-4217-0064-7



9 785421 700647

Курганский
государственный
университет



РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР

43-38-36

**Министерство образования и науки
Российской Федерации**

Курганский государственный университет

В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров

**ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ**

Монография

Курган 2010

УДК 621.318.3

ББК 31.261.3

М 87

Рецензенты:

профессор кафедры «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» Курганской государственной сельскохозяйственной академии им. Т.С. Мальцева, доктор технических наук В.И. Чарыков;

заместитель руководителя Уральского управления РОСТЕХНАДЗОРА, кандидат технических наук П.В. Москвин.

Печатается по решению научного совета Курганского государственного университета.

М 87 Мошкин В.И. Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: Монография. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.

Книга посвящена вопросам разработки и создания линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД), применяемых в машинах для импульсных технологий. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований ЛЭМД с новыми рабочими процессами.

Обобщены материалы по практическому применению ЛЭМД в современном оборудовании. Даны методы расчета основных параметров ЛЭМД.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов, специализирующихся в области новых систем электромагнитного привода и электрических машин.

Рис. – 75, табл. – 14, библиограф. – 302 назв.

УДК 621.318.3

ББК 31.261.3

ISBN 978-5-4217-0064-7

© Курганский государственный университет, 2010

© Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г., 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	5
Введение	6
1. Линейные электрические двигатели для импульсных технологий ..	9
1.1. Сравнительный анализ линейных приводов для импульсных машин	9
1.2. Вопросы терминологии импульсных линейных двигателей и содержащих их систем	21
1.3. Принципы классификации импульсных ЛЭМД	27
1.4. Области и перспективы применения машин с ЛЭМД	32
1.5. Основные показатели машин с ЛЭМД	40
2. Магнитные системы импульсных ЛЭМД с повышенными удельными энергетическими и силовыми показателями	50
2.1. Принципы повышения удельных энергетических и силовых показателей магнитных систем ЛЭМД	50
2.2. Магнитные системы ЛЭМД с укороченным магнитопроводом	51
2.3. Магнитная система ЛЭМД с комбинированным якорем, двумя рабочими зазорами и ферромагнитным направляющим корпусом	55
2.4. Магнитные системы импульсных ЛЭМД с зубцовым магнитопроводом	57
2.5. Сравнение магнитных систем импульсных ЛЭМД	63
3. Конструктивные схемы ударных машин с ЛЭМД	69
3.1. Синхронная электромагнитная машина с однокатушечным ЛЭМД со свободным выбегом якоря	70
3.2. Синхронная электромагнитная машина с двухкатушечным ЛЭМД с постоянным воздействием электромагнитных сил	73
3.3. Электромагнитная машина с однокатушечным ЛЭМД простого и двойного действия	75
3.4. Электромагнитная машина с двухкатушечным ЛЭМД двойного действия	78
4. Энергопреобразование в ЛЭМД с аккумулярованием энергии в статических и динамических режимах	85

4.1. Энергопреобразование в однообмоточных ЛЭМД с аккумулярованием магнитной энергии в статических режимах	85
4.2. Энергопреобразование в однообмоточных ЛЭМД с предварительным аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах	92
4.3. Энергопреобразование в двухобмоточных ЛЭМД двойного действия с аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах период холостого хода якоря	97
4.4. Интенсификация процессов в режиме аккумулярования магнитной энергии в импульсных ЛЭМД	103
5. Динамические режимы ЛЭМД	111
5.1. Математическая модель ЛЭМД	111
5.2. Моделирование динамических характеристик ЛЭМД	123
5.3. Динамические процессы неуправляемого однообмоточного ЛЭМД	128
5.4. Динамические процессы управляемого однообмоточного ЛЭМД с интенсификацией рабочего процесса	143
6. Расчет импульсных ЛЭМД	151
6.1. Обобщенные математические модели импульсных ЛЭМД	151
6.2. Расчет сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных ферромагнитных цилиндров	153
6.3. Расчет статических характеристик магнитных систем ЛЭМД с двумя рабочими зазорами, комбинированным якорем и неферромагнитным направляющим корпусом	157
6.4. Расчет статических характеристик магнитных систем ЛЭМД с двумя рабочими зазорами, комбинированным якорем и ферромагнитным направляющим корпусом	164
6.5. Оценка режимов работы машин с ЛЭМД из условий допустимого нагрева при естественном охлаждении	175
6.6. Оценка предельных значений удельной энергии удара и скорости перемещения якоря ЛЭМД при однократном срабатывании в продольном магнитном поле	189
Заключение	200
Список литературы	201

ПРЕДИСЛОВИЕ

В ряде отраслей промышленности используются технологические процессы, механизация которых осуществляется устройствами и машинами импульсного действия [1–7]. В качестве технических средств, позволяющих реализовать импульсные технологии, широко используются машины ударного действия с пневмо-, гидро- и электроприводом, для которых современная методология позволила разработать эффективные методы анализа и синтеза, выявить общие вопросы исследования и проектирования таких машин и создать для них единую теорию силовых импульсных систем.

С развитием технических средств расширяются области применения основных элементов импульсных систем и одновременно повышаются требования к обеспечению необходимых режимов работы, надежности, снижению энергопотребления, массогабаритных и стоимостных показателей. Решение этих вопросов непосредственно связано с участием в технологических процессах самих машин, для которых необходимо обеспечить оптимальные режимы работы с целью повышения производительности труда и снижения себестоимости выпускаемой продукции, а также ограничения воздействия на окружающую среду. Наиболее полно обеспечивают выполнение данных требований силовые электрические импульсные системы, осуществляющие непосредственное преобразование электроэнергии в механическую работу, что обуславливает возможность существенного упрощения кинематической схемы, снижение массогабаритных показателей машин, улучшение экологической обстановки, повышение надежности и экономичности данных устройств.

Процесс дальнейшего развития и совершенствования ударных машин выявил перспективность использования силовых электромагнитных импульсных систем (СЭМИС) на основе линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД), которые по сравнению с другими типами линейных двигателей, наиболее пригодны для привода машин импульсного (ударного) и прессового действия, позволяя совмещать приводной двигатель и рабочий орган машины.

Сегодня имеется большой опыт использования молотков, перфораторов, насосов, прессового оборудования, переносных ударных комплексов и различного технологического оборудования бытового назначения, созданных на основе импульсных ЛЭМД, а также налажено серийное производство части из них.

Дальнейшее расширение области применения ЛЭМД связано с поиском путей повышения их силовых и энергетических показателей, с совершенствованием методов расчета.

В настоящей монографии отражены работы авторов, выполненные в последние годы и не публиковавшиеся по данному направлению.

ВВЕДЕНИЕ

Современная экономическая ситуация в России и переход к рыночным отношениям острее чем прежде ставят перед учеными и инженерами задачи по созданию конкурентоспособной техники для прогрессивных технологий в горном деле, машиностроении, строительстве. Среди многочисленных технологических процессов в этих и других отраслях наиболее важные связаны с изменением состояния, формы и других характеристик прочных, естественных или искусственных материалов. В ряде случаев такие процессы наиболее эффективно осуществляются с помощью импульсных технологий, характеризующихся прерывистой посылкой отдельных порций энергии к объекту воздействия и реализуемых посредством взрывчатых веществ, магнитно-импульсных и электроразрядных установок, ударных машин и других устройств импульсного действия.

Импульсный подвод энергии позволяет за счет дозировки длительности и интенсивности воздействия резко повысить плотность энергии, вводимой в объект, оптимально управлять нестационарными тепловыми, механическими, химическими и другими процессами и получить ряд эффектов, свойственных конкретным технологическим процессам.

Актуальность исследований по созданию технических средств для импульсных технологий неоднократно отмечалась в государственных программах по решению задач ускорения научно-технического прогресса.

Наиболее распространенными техническими средствами реализации этих технологий в горном деле, машиностроении, строительстве являются разнообразные по конструкции и параметрам пневматические, гидравлические, гидропневматические машины вибрационного и ударного действия, по которым создана современная научная методология анализа и синтеза.

Общие вопросы исследования и создания машин вибрационного и ударного действия получили четкую трактовку в виде теории силовых импульсных систем, основные положения которой разработаны в трудах О.Д. Алимова, П.М. Алабужева, А.М. Ашавского, А.Я. Вольперта, В.С. Шейнбаума, С.А. Басова, А.Ф. Кичигина, А.Д. Костылева, А.Я. Тишкова, А.И. Федулова, В.К. Манжосова, Н.П. Ряшенцева, Г.А. Сипайлова, А.В. Фролова, И.А. Янцена, Л.Т. Дворникова, Н.А. Клушина, К.К. Тупицына, Б.Н. Смоляницкого и др. В этих работах рассмотрены теоретические и практические вопросы развития импульсной техники.

Известные недостатки пневматических, гидравлических и гидропневматических машин вибрационного и ударного действия и стремление принципиального усовершенствования технологий, в которых они применяются, давно (еще с 30-х годов) уже вызвали необходимость создания ударных машин с электроприводом. Значительный вклад в разработку этой проблемы внесли П.М. Алабужев, О.Д. Алимов, Н.М. Батуев, А.В. Фролов, Б.Г. Гольдштейн,

В.К. Манжосов, А.И. Москвитин, К.Н. Шмаргунов, Н.П. Ряшенцев, К.М. Рагульскис, С.Ю. Кудараускас, Г.А. Сипайлов, Ф.Н. Сарапулов, А.Ю. Коняев, В.В. Ивашин, Е.М. Тимошенко, А.П. Тронов, О.Н. Веселовский, Ю.З. Ковалев, И.А. Милорадов, А.Т. Малов, А.В. Носовец, В.Т. Чемерис, А.А. Афонин, Г.В. Берозашвили, Б.Ф. Симонов, А.Н. Мирошниченко, А.П. Малахов и другие специалисты.

Разработанные в настоящее время конструкции электромеханических электромагнитных машин вибрационного и ударного действия нашли широкое применение в импульсных технологиях механизации ручных работ в строительной и монтажной практике, в буровых автоматах для исследования недр планет солнечной системы.

Дальнейшее развитие и совершенствование вибрационных и ударных машин с электроприводом связано с прогрессивной тенденцией органического сращивания двигателя с рабочим органом машины, т.е. с разработкой импульсных линейных электродвигателей, позволяющих обеспечить непосредственное преобразование электрической энергии в механическую работу, в электроприводах машин с линейной траекторией движения рабочих органов.

Техническая реализация данного направления дает такие известные преимущества, как упрощение и удешевление всего оборудования, повышение его энергетических характеристик, надежности, улучшение массогабаритных показателей, снижение шума, затрат на обслуживание, достижение больших ускорений и замедлений без износа механических частей, более удачное решение эргономических проблем, удовлетворение современных требований эстетики.

Целесообразность разработки этого направления становится очевидной, если учесть, что в настоящее время по ориентировочной оценке около половины серийных электрических двигателей используется для привода машин с линейной траекторией движения рабочих органов через нерегулируемые редукторы, потери в которых составляют до 30% от мощности двигателя.

Линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД) относятся к импульсным электромеханическим преобразователям и представляют самостоятельный класс специальных электрических машин, обладающих рядом специфических свойств: ограниченностью механического перемещения, дискретным энергопреобразованием. Они приспособлены, как правило, к определенным приводным устройствам и должны часто изготавливаться в одном с ним блоке. Поэтому ЛЭМД необходимо проектировать совместно с приводной рабочей машиной, имеющей определенный характер нагрузки и силовой импульсной системой питания и устройством управления и регулирования.

В ЛЭМД сочетаются конструктивная простота, надежность и долговечность работы, экономичность регулирования в широких пределах выходных характеристик. По сравнению с другими линейными электродвигателями ЛЭМД более пригодны для привода машин ударного, прессового (ручные ударные машины, молоты, прессы) и вибрационного действия (насосы, компрессоры, испытательные установки).

Применение ЛЭМД в данном случае следует считать идеальным, так как параметры движения двигателя и рабочих органов этих машин совпадают. Они оказываются целесообразными и во многих других случаях, когда становятся важными следующие их преимущества:

- использование наиболее распространенного и экологически чистого вида энергии;
- большие возможности автоматизации технологических процессов;
- сравнительно высокие удельные показатели и КПД преобразования энергии;
- возможность работы в экстремальных условиях (при низких отрицательных температурах, под водой, в вакууме);
- возможность создания машин без промежуточных преобразователей движения.

Попытка наилучшим образом использовать импульсные ЛЭМД выявила возможность применения их в строительстве, горной, нефтяной и газовой промышленности, машиностроении, водном хозяйстве, криогенной технике, медицине и т.д. [1 – 45; 49 – 50; 58; 60; 63; 66; 70; 72 – 75; 140; 141; 148; 163; 212; 236], где они обеспечивают значение ударной энергии в диапазоне от 0,1 до 10^4 Дж при массогабаритных показателях до $1,5 \cdot 10^4$ кг. Однако значение такого показателя, как удельная энергия удара, у лучших в своем классе электромагнитных машин сегодня не превышают 5 Дж/кг, что почти в три раза ниже, чем у аналогичных по назначению устройств с пневмоприводом. Возрастающая необходимость дальнейшего повышения удельных силовых и энергетических показателей требует поиска новых путей, позволяющих получить желаемый результат, и технических возможностей.

В настоящей монографии обобщены результаты работ в этом направлении.

1. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

1.1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ МАШИН

В настоящее время большое распространение в машинах ударного действия получили пневматические, гидравлические, электромеханические приводы и их гибриды: пневмогидравлические, электрогидравлические (рис. 1.1).

Основные достоинства пневмопривода: простота конструкции, пожаробезопасность и высокая надежность – способствовали широкому распространению его при механизации и автоматизации литейного производства. Недостатки – низкая производительность и КПД, не превышающий 11%, повышенный шум при работе, быстрый износ и сложность обеспечения надежности уплотнений, что резко снижает ресурс пневмодвигателей. Так, диафрагменные пневмодвигатели, используемые в приводе прессов малых усилий на заводах радиотехнической промышленности, выдерживают не более 500 – 600 тысяч включений [267], уплотнения поршневых пневмодвигателей истираются после 10 – 15 тысяч ходов [268]. Способность воздуха сжиматься и расширяться является одной из основных причин трудностей в регулировании скорости движения, приводимого в действие механизма. Усилие, развиваемое пневмоприводом, зависит от давления воздуха в рабочих полостях, поэтому для создания значительных усилий пневмопривод должен иметь большие габариты, что вызывает соответствующие трудности в изготовлении пневмоцилиндров. Машины при этом становятся громоздкими и неудобными в эксплуатации, что неприемлемо, особенно при работе в стесненных условиях.

Основными особенностями гидропривода являются: возможность создания больших усилий сравнительно небольшими по габаритным размерам силовыми устройствами, бесступенчатое регулирование скорости в широком диапазоне, плавный ход механизмов, а также возможность управления скорости режимами работы привода во время их движения, простота автоматизации, бесшумность работы. Однако гидропривод сложен по конструкции, дорог в изготовлении и эксплуатации. К недостаткам гидропривода относятся прекращение действия при нарушении герметичности и снижение КПД при пониженных температурах из-за увеличения вязкости рабочей жидкости. Насосный гидропривод требует больших расходов жидкости, в отличие от объемного, что обусловлено высоким темпом работы оборудования, к примеру, автоматических формовочных линий, где скорость достигает 0,5 м/с.

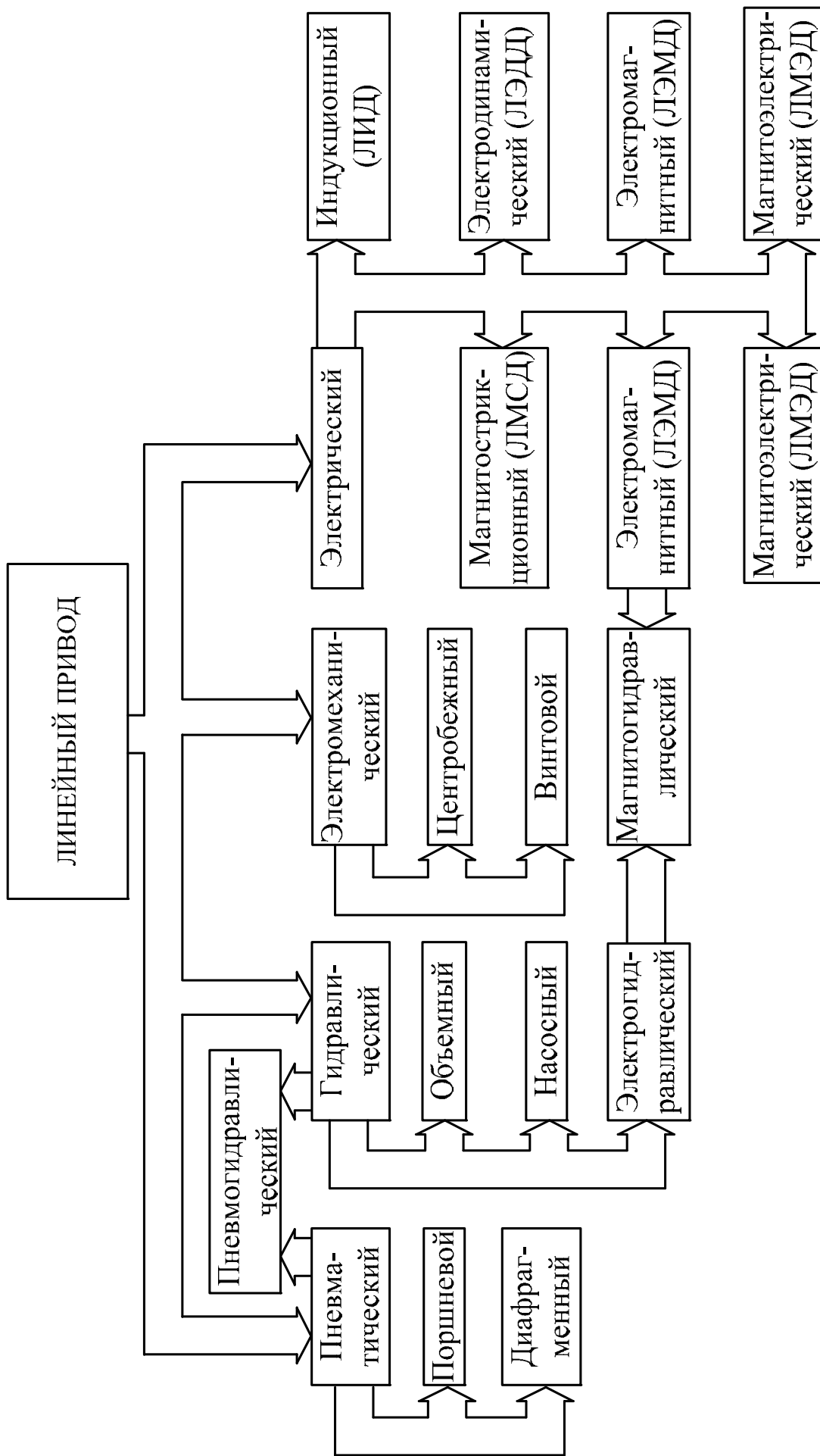


Рис. 1.1. Классификация линейных приводов различных типов

В гидроприводах обычно применяют воспламеняющиеся минеральные масла. При высоких давлениях в гидросистеме всегда имеются утечки масла, что вызывает опасность воспламенения, так как поблизости находится сварочная дуга и расплавленный металл.

Пневмогидравлический привод сочетает преимущества как пневматического (по лёгкости управления, точности слежения), так и гидравлического привода, имея повышенное в 1,5-3 раза [269] по сравнению с пневмоприводом быстродействие и малые габаритные размеры исполнительных устройств. К недостаткам этого привода относится высокая стоимость и конструктивная сложность, что ведёт к низкой надёжности.

Электрогидравлический привод получил широкое распространение в тормозах подъёмно-транспортных машин, допускает регулирование хода и скоростей прямого и обратного ходов. Усилие штока не зависит от его положения и практически постоянно на всей длине рабочего хода. По сравнению с электромагнитными электрогидравлические приводы имеют меньшую стоимость и повышенную долговечность, потребляют меньшую мощность, на их изготовление расходуется в 8 - 10 раз меньше меди [270]. Их преимуществом является и то, что при обратном ходе поршня они превращаются из источника механической энергии в демпфер-замедлитель с регулируемой скоростью исполнительного органа. Однако они имеют большее по сравнению с электромагнитными приводами время срабатывания, изменяющееся в зависимости от температуры окружающей среды, влияющей на вязкость рабочей жидкости, и требуют надёжных уплотнений.

Магнитогидравлический привод сочетает преимущества электромагнитного и электрогидравлического приводов, отличается плавным процессом включения даже при недогрузках, отсутствием вращающихся частей и малым износом поступательно движущихся элементов, а также простотой конструкции. Однако он в несколько раз тяжелее электрогидравлического привода, для его изготовления требуется в 2 - 5 раз больше массы обмоточных проводов, а в установившемся режиме он требует мощность в 8 - 10 раз большую, чем электрогидравлический привод [270].

Наиболее распространённый практически во всех отраслях промышленности электромеханический привод включает в себя электрический двигатель вращательного движения и механическую передачу, преобразующую вращательное движение электродвигателя в возвратно-поступательное движение рабочего органа. Самыми распространёнными механическими звеньями привода являются кривошипные (эксцентрикковые и коленчатые) передачи. Зависимости массы m , мощности электродвигателя $P_{эд}$, частоты ходов в минуту f от номинального усилия F кривошипных приводов простого действия представлены на рис. 1.2.

Основное преимущество кривошипных приводов - высокая производительность, однако они имеют и ряд существенных недостатков: длинные кине-

матические цепи с большим числом промежуточных звеньев, потребность в частой и обильной смазке, быстрый износ вращающихся узлов.

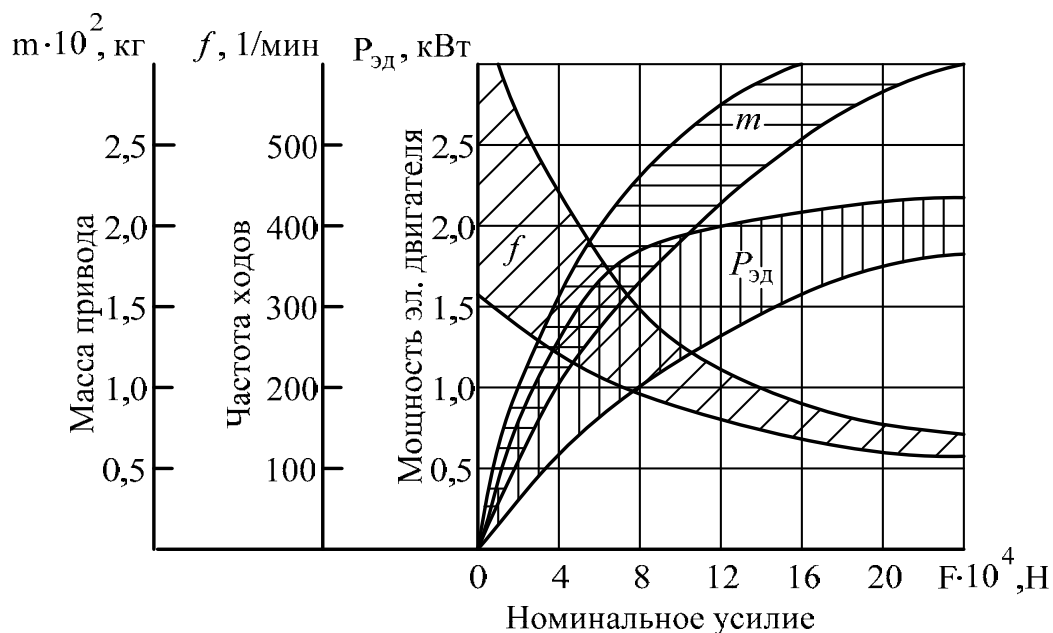


Рис. 1.2. Характеристики кривошипных приводов простого действия

Среди механических передач электромеханических приводов, также широкое распространение получили передачи зацеплением (зубчато-реечные, гайка-винт, цепные), трением (фрикционные, канатные, со стальной лентой), рычажные и другие [271]. Представление о рабочих перемещениях и скоростях, реализуемых электромеханическими приводами, даёт рис. 1.3 [272].

Из-за наличия в механических передачах люфтов, трения, упругих деформаций, неравномерности передачи движения, эти приводы часто не удовлетворяют требованиям по надёжности оборудования. Поэтому в последнее время всё шире используется другой способ получения линейного движения, который опирается на непосредственное преобразование электрической энергии в возвратно-поступательное движение с помощью линейных электрических двигателей (ЛЭД), представляющих собой самостоятельный класс электрических машин. По принципу действия, определяющему конструктивные особенности и технические возможности ЛЭД, они подразделяются на следующие основные виды: индукционно-динамические (ЛИДД), магнитоэлектрические (ЛМЭД), магнитоэлектрические (ЛМСД), электрострикционные (ЛЭСД), асинхронные (ЛАД), электродинамические (ЛЭДД), электромагнитные (ЛЭМД). По простоте конструкции ЛИДД приближаются к электромагнитному ЛЭМД. При протекании по катушкам возбуждения импульса тока магнитный поток проходит через зазор между короткозамкнутыми витками на якоре и соответствующими ка-

тушками. Скорость срабатывания ЛИДД составляет $1 \cdot 10^{-3}$ с на длине хода до 20 мм при КПД 30 – 40 %.

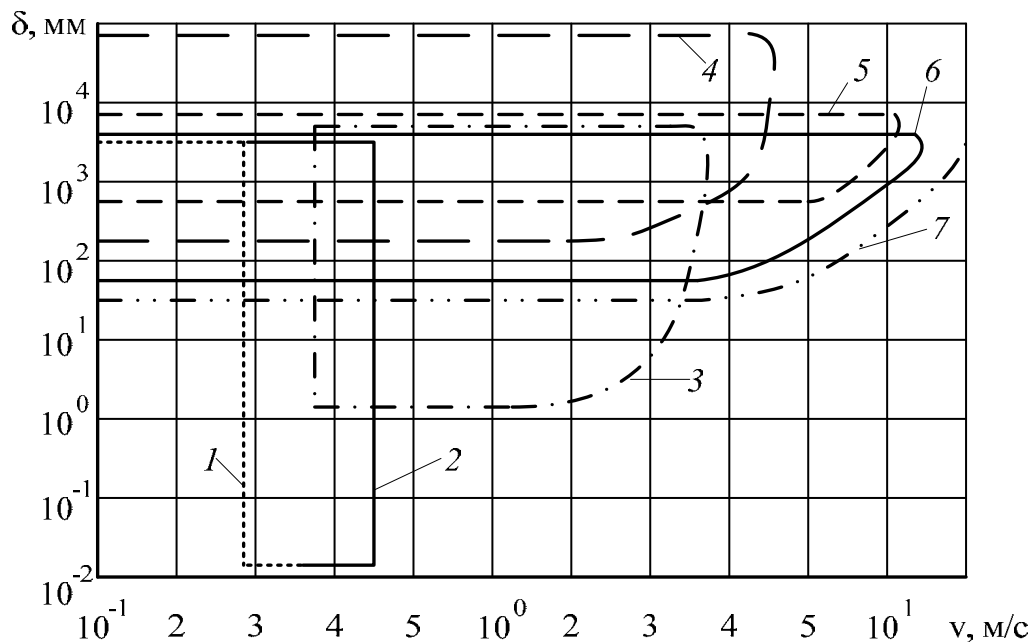


Рис. 1.3. Диапазоны рабочих перемещений δ и скоростей v , реализуемые электромеханическими приводами: 1 - с винтовыми передачами с резьбой; 2 - с винтовыми передачами с обкатом; 3 - с цилиндрическими передачами; 4 - с канатно-барабанными передачами; 5 - с цепными передачами; 6 - с зубчато-реечными передачами; 7 - с фрикционными передачами

Экспериментальные исследования ЛИДД показали, что средняя сила на форсированных режимах может достигать 250 – 400 Н на килограмм массы индуктора [10].

В магнитоэлектрических двигателях обмотка возбуждения, питаемая постоянным током, заменена постоянным магнитом, поле которого взаимодействует с переменным полем, создаваемым обмотками. Рабочие процессы магнитоэлектрического и электродинамического двигателей подобны, так как постоянный магнит обычно используется в качестве фиктивного контура возбуждения. Машины с постоянными магнитами практического применения в качестве ударных машин пока не получили. Однако достигнутый прогресс в области новых сплавов для постоянных магнитов позволяет использовать их как источник магнитного поля в машинах данного типа, так как удельная магнитная энергия современных постоянных магнитов может быть больше, чем у электромагнитов. Это преимущество особенно проявляется у машин малой мощности, так как магнитная энергия постоянных магнитов пропорциональна кубу линейных размеров, а энергия электромагнита – четвертой степени линейных размеров.

Линейные магнитострикционные двигатели применяются в буровых и породоразрушающих машинах, основанных на использовании звуковых вибраторов. Достоинством ЛМСД в данной области применения являются высокий

моторесурс, превышающий 5000 часов при общем КПД преобразования энергии 65 %, большие удельные мощности, достигающие до 10 кВт/см^2 [116]. Однако в приводе резца для технологии безотходной обработки металла терморезанием ЛМСД не применимы из-за малых величин рабочего хода, не превышающих 2 мм, полезной удельной работы, больших линейных размеров, дороговизны.

Линейные электрострикционные двигатели имеют простую конструкцию, малые габариты, развивают тяговое усилие до 100 Н, имеют КПД 65 %. ЛЭСД обладают высокой технологичностью изготовления и надёжностью работы, определяемой отсутствием обмоток возбуждения, низкой металлоёмкостью, которая может быть сведена к нулю, высокими удельными показателями. В настоящее время основная область применения ЛЭСД - обеспечение прецизионных линейных перемещений, привод отдельных узлов магнитофонов, вибрационных устройств. В приводе кузнечно-прессового оборудования ЛЭСД не используется из-за низких значений тяговых сил, перемещений, недостаточной динамической прочности якоря.

Согласно рис. 1.4. [272], на котором представлены типичные для линейного электрического привода (ЛЭП) диапазоны рабочих перемещений и скоростей, все ЛЭП можно разбить на три группы:

1. Приводы с линейными синхронными и асинхронными двигателями, которые предназначены для использования в системах транспорта на расстояния больше 1 м. Скорость перемещения в таких приводах зависит от конструкции двигателя и частоты питающего напряжения. При использовании напряжения питания сетевой частоты 50 Гц синхронная скорость движения обычно больше 3 м/с. В линейных асинхронных приводах с частотным управлением диапазон регулирования скорости движения якоря определяется возможностями преобразователей частоты. КПД синхронных и асинхронных двигателей растёт с увеличением скорости, поэтому они используются в основном для создания высокоскоростного наземного транспорта. Применение синхронных и асинхронных двигателей в низкоскоростных регулируемых приводах малых перемещений нецелесообразно, так как требует значительных затрат на реализацию частотного управления.

2. Электроприводы с двигателями постоянного тока обычно создаются на максимальные перемещения от нескольких сантиметров до нескольких метров. Использование этих двигателей для создания больших перемещений нецелесообразно, так как требует существенных затрат активных материалов, которые располагаются по всей длине рабочего хода. Максимальная скорость перемещения рабочего органа обычно не превышает 10 м/с, поскольку при малом ходе сложно развить высокие скорости [273].

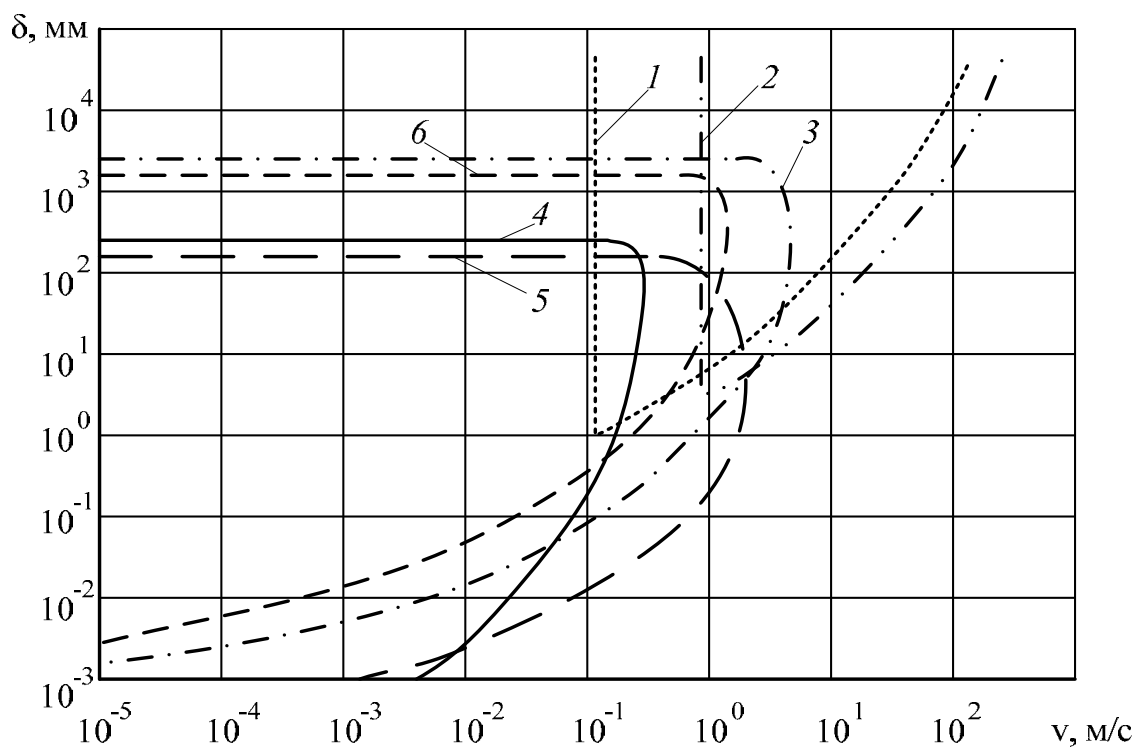


Рис. 1.4. Диапазоны рабочих перемещений δ и скоростей v , реализуемые непосредственно линейными приводами: 1 - с асинхронными двигателями; 2 - с синхронными двигателями; 3 - с двигателями постоянного тока; 4 - с электромагнитными двигателями; 5 - с электродинамическими двигателями; 6 - с шаговыми двигателями

3. Линейные приводы с электромагнитными (ЛЭМД) и электродинамическими (ЛЭДД) двигателями используются для создания перемещений от долей миллиметра до 0,1 - 0,3 м. Максимальная скорость движения якоря ЛЭМД обычно не превышает 2 м/с. Благодаря меньшей инерционности подвижных частей в приводах с электродинамическими двигателями можно получать большие скорости движения, чем в приводах с ЛЭМД. Основным недостатком ЛЭДД - наличие обмотки на подвижном якоре, что предопределяет низкую надёжность и долговечность данного типа привода при использовании его в ударных машинах.

Необходимые представления об амплитудно-частотных характеристиках некоторых из рассмотренных приводов даёт рис. 1.5. Каждый из рассмотренных приводов имеет свои особенности, поэтому анализ их технических характеристик обычно не даёт однозначного ответа о том, какой из приводов будет наиболее эффективным в том или ином технологическом процессе. Следовательно, различные варианты требуется сравнить по какому-то обобщённому критерию, учитывающему основные технические характеристики привода. Одним из таких показателей, характеризующих силовые возможности привода, является удельная сила тяги, представляющая собой отношение максимальной тяговой силы F привода к его собственной массе m (табл. 1.1).

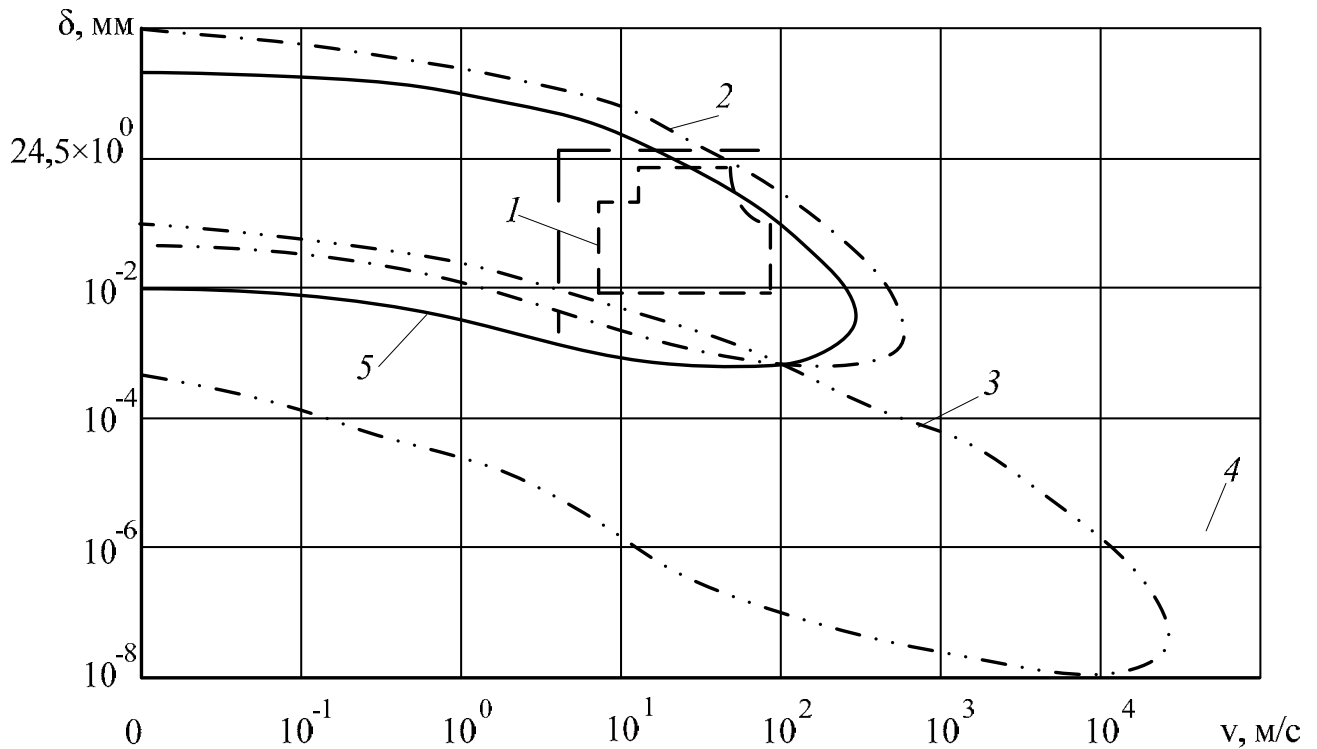


Рис. 1.5 Амплитудно-частотные характеристики приводов: 1 - электро-механического; 2 - гидронасосного; 3 - гидрообъемного; 4 - электродинамического и индукционно-динамического; 5 – электромагнитного

Таким образом, среди рассмотренных приводов наиболее эффективным является гидравлический привод с удельной силой тяги $F_* = 10 \text{ кН/кг}$. Однако данный показатель не учитывает совокупность всего технического оснащения, необходимого для осуществления заданного технологического процесса с применением рассматриваемого типа привода. Ведь здесь для расчётов берётся масса лишь самой рабочей машины, а не всего комплекса агрегатов, обеспечивающих её работу. Поэтому данный показатель следует использовать лишь для сравнения приводов, составляющих единый класс машин с одним и тем же количеством ступеней энергопреобразования. Например, среди рассмотренных линейных электрических двигателей по удельной силе тяги можно выделить ЛЭМД и ЛИДД, из которых наиболее эффективным является ЛЭМД, имеющий больший КПД.

Таблица 1.1

Предельные показатели линейных приводов различных типов

Тип привода	Частота ходов, Гц	Рабочий ход, мм	Тяговое усилие, кг	КПД, %	Удельная сила тяги, Н/кг
Электромеханический	300	70	4500	65	200
Пневматический	200	≥300	3000	11	650
Гидравлический	800	≥500	130000	85	10000
Электромагнитный	600	2000	15000	80	3000
Электродинамический	15000	300	45000	20	20
Индукционный	200	неогранич.	7150	80	8
Индукционно-динамический	60	50	153000	50	4000
Магнитоэлектрический	15000	30	102	60	1
Магнитоэлектрический	30000	4	61225	62	50
Электрострикционный	15000	10	10	85	500

Сравнения же принципиально разных типов приводов между собой необходимо производить по общему КПД всей системы энергопреобразования каждого из них.

Проведём сравнительный анализ систем, обслуживающих два наиболее эффективных типа приводов: гидравлический (гидроцилиндр) и электромагнитный (ЛЭМД).

Главным достоинством гидроцилиндра по сравнению с ЛЭМД является его более высокий КПД. Преобразование энергии в системе, содержащей гидроцилиндр, происходит в соответствии с рис. 1.6 а.

При этом общий КПД системы с гидроцилиндром равен:

$$\eta_o^{\Gamma} = \eta_{\text{Эд}} \cdot \eta_{\text{рд}} \cdot \eta_{\text{Гд}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{Г}} , \quad (1.1)$$

где $\eta_{\text{Эд}}$ – КПД электродвигателя (для двигателей переменного тока $\eta_{\text{Эд}} \approx 0,93$ [274]); $\eta_{\text{рд}}$ – КПД редуктора (для двухступенчатого редуктора $\eta_{\text{рд}} \approx 0,94$ [275]);

$\eta_{\text{гн}}$ – КПД гидронасоса (используемые плунжерные гидронасосы с давлением более 250 атмосфер имеют $\eta_{\text{гн}} \approx 0,76$ [276]); $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трубопровода, который для двухпроводной системы с двумя изгибами, давлением 250 атмосфер, диаметром проходного сечения 50 – 75 мм составляет $\eta_{\text{тр}} \approx 0,85$ [278];

$\eta_{\text{г}}$ – КПД гидроцилиндра двойного действия, $\eta_{\text{г}} \approx 0,85$ [277].

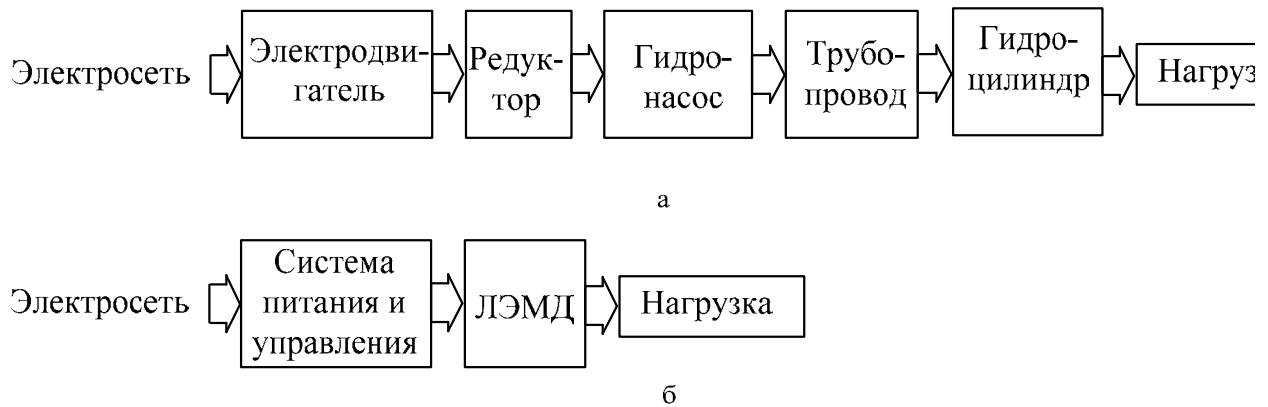


Рис. 1.6. Схема энергопреобразования в системе: а – с гидроцилиндром; б – с линейным электромагнитным двигателем

Подставляя значения перечисленных величин в (1.1), получаем:

$$\eta_0^{\Gamma} = 0,93 \cdot 0,94 \cdot 0,76 \cdot 0,85 \cdot 0,85 = 0,48.$$

Таким образом, при достаточно высоком КПД самого гидроцилиндра общий КПД системы, содержащей его, получается равным $\eta_0^{\Gamma} \approx 0,48$ из-за многократного преобразования энергии из одного вида в другой.

В соответствии со схемой, представленной на (рис. 1.6 б), происходит преобразование энергии в системе содержащей ЛЭМД. Общий КПД такой системы $\eta_0^{\text{ЭМ}}$ равен:

$$\eta_0^{\text{ЭМ}} = \eta_{\text{СПУ}} \cdot \eta_{\text{ЭМ}}, \quad (1.2)$$

где $\eta_{\text{спу}}$ – КПД системы питания и управления ЛЭМД. Для применяемых тиристорных преобразователей $\eta_{\text{спу}} = 0,98$; $\eta_{\text{эм}}$ – КПД ЛЭМД $\eta_{\text{эм}} = 0,8$ [10]. Подставляя значения перечисленных величин в (1.2), получаем:

$$\eta_0^{\text{эм}} = 0,98 \cdot 0,8 = 0,784 .$$

При меньшем по сравнению с гидроцилиндром собственном КПД линейного электромагнитного двигателя $\eta_{\text{эм}}$ общий КПД системы, содержащей ЛЭМД, выше КПД системы с гидроприводом, поскольку в ней преобразование энергии происходит непосредственно из электрической в механическую. При этом обеспечиваются простота и высокая надёжность канализации электрической энергии по кабелю по сравнению с гидравлическим шлангом высокого давления, а также отсутствует дополнительное оборудование в виде электродвигателя, насоса и редуктора.

В результате анализа [10; 12; 26; 31; 63; 67; 70; 96] источников были построены зоны зависимости массы, мощности двигателя, удельной мощности двигателя, удельной механической энергии двигателя от механической энергии двигателя и механической энергии двигателя от числа ходов в минуту для различных видов приводов (рис. 1.7).

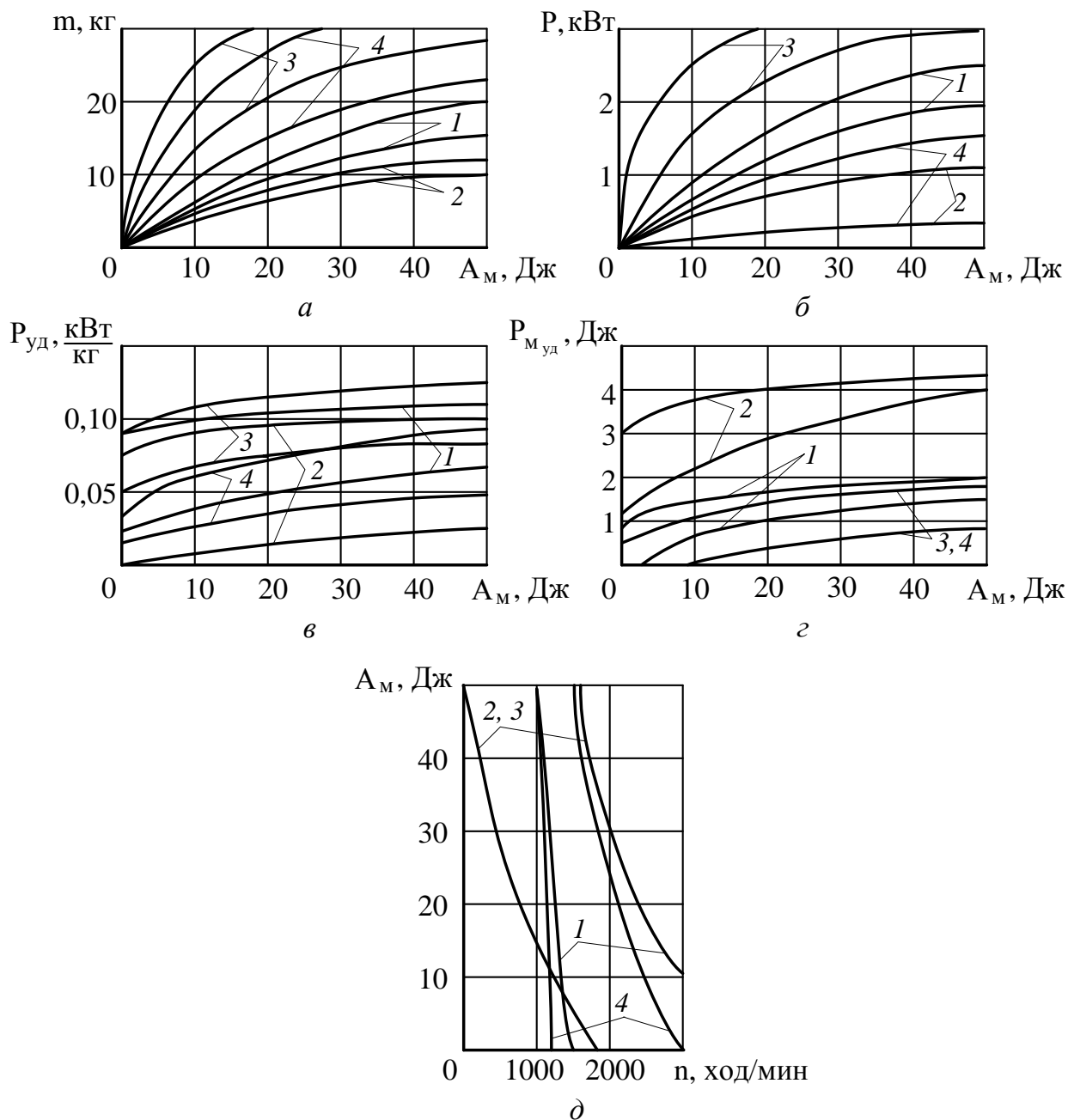


Рис. 1.7. Зоны зависимости: а - массы двигателя; б - мощности двигателя; в - удельной мощности двигателя; г - удельной механической энергии от механической энергии двигателя; д - механической энергии давления от числа ходов в минуту для: 1 - электромагнитного, 2 - пневматического, 3 - гидравлического, 4 - электромеханического приводов вращательного движения

1.2. ВОПРОСЫ ТЕРМИНОЛОГИИ ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СОДЕРЖАЩИХ ИХ СИСТЕМ

При рассмотрении импульсных линейных электрических двигателей (ЛЭД) возникает ряд терминологических вопросов, правильные ответы на которые устранили бы неоднозначность и противоречивость отдельных понятий, терминов, способствовали бы облегчению понимания и обмена научной информацией. В связи с этим представляется необходимым рассмотреть некоторые принципиальные для рассматриваемых двигателей вопросы терминологии.

Критический анализ терминологии ЛЭД и предложения по их рациональности содержатся в ряде работ [28; 31; 279; 280; 281] и привлекают многочисленных исследователей. Несмотря на это терминологические вопросы ЛЭД ждут еще своего решения.

Остановимся на тех, которые касаются определений «линейный электродвигатель» и «линейный электропривод» и их элементов. Мы разделяем мнение профессора О.Н. Веселовского, что «линейный» двигатель – неудачное название двигателя поступательного движения, так как понятие «линейный» давно уже связывают в науке и технике с математической характеристикой той или иной модели и среды [279]. Применительно к рассматриваемым электрическим машинам термин «линейный» определяет траекторию движения подвижной части, т.е. отражает пространственное свойство механического движения.

Предлагались и другие названия этих двигателей: «возвратно-поступательного движения», магнитофугальные, «поступательного» (прямолинейного), но они не закрепились и общепринятым в настоящее время является термин «линейный электродвигатель».

Однако и в этот термин различными исследователями вкладываются различные понятия. Наиболее распространенная точка зрения: к линейным двигателям относятся те, которые используют «бегущее» поле и имеют непрерывное движение.

Линейные двигатели могут быть асинхронными, синхронными и постоянного тока, повторяя по принципу своего действия соответствующие двигатели вращательного движения.

Профессор Г.И. Штурман дает такое определение: «Линейный двигатель есть дуговой разомкнутый двигатель в том частном случае, когда радиус дуги стремится к бесконечности» [281].

По нашему мнению, к линейным электродвигателям необходимо отнести электромеханические преобразователи с прямолинейной траекторией движения подвижной части. В настоящее время нашли наибольшее применение следующие типы ЛЭД: электромагнитные, индукционные, электродинамические, ин-

дукционно-динамические, магнитоэлектрические, магнито- и электрострикционные.

Как показал профессор И.П. Копылов, возможны и другие типы электро-механических преобразователей, в том числе и гибридные [173].

По нашему мнению, основное отличие линейных электродвигателей от электродвигателей вращательного движения заключается в различии пространственных свойств механического движения и оно должно быть закреплено в их названии. В этой связи мнение профессора С.Ю. Кудараускаса о том, что «пространственные свойства движения определяют некоторые конструктивные особенности машины, однако характер протекающих процессов, взаимосвязь различных переменных параметров не зависят от этих пространственных свойств», представляется нам спорным [280].

Рассмотрение рабочих процессов, например, линейных асинхронных двигателей [20, 29], подтверждает это. Действительно, специфика конструкции магнитной системы и расположение обмоток линейных асинхронных машин приводит к возникновению краевых эффектов и своеобразной коммутации цепей тока вторичного элемента [8, 282]. Эта же специфика обуславливает необходимость сравнительно больших магнитных зазоров между статором и вторичным элементом. Все эти факторы влияют на характер протекающих процессов и взаимосвязь параметров. Следует отметить, что в ГОСТ 16593-79 закреплено пространственное свойство механического движения, так как линейный электропривод определяется как электропривод, электродвигательным устройством которого является линейный электродвигатель.

Вызывает возражение мнение профессора С.Ю. Кудараускаса о том, что только временные свойства механического движения (непрерывное, колебательное, импульсное) определяют закономерность протекающих процессов в электрических машинах. По нашему мнению, только оба свойства механического движения (пространственные и временные) определяют закономерность протекающих процессов и взаимосвязь параметров линейных электрических двигателей. В связи с этим в название электрического двигателя целесообразно вводить обе характеристики движения подвижного элемента. Следует особо отметить, что в свое время был разработан государственный стандарт на электрические машины вращательного движения (ГОСТ 16352-70). ГОСТ на электрические машины с линейной траекторией движения подвижных частей отсутствовал, хотя отдельные виды таких машин и приводов были отражены в ГОСТ 25988-83 (перфораторы ручные электромагнитные), ГОСТ 25989-83 (молотки ручные электромагнитные), ГОСТ 18802-80 (электромагнитный возбудитель), ГОСТ 16593-89 (линейный электропривод).

По нашему мнению, основным признаком линейных электрических двигателей, определяющим их технико-экономические показатели и область применения, является принцип действия. В связи с этим в названии линейного электрического двигателя должен быть обязательно введен и этот признак. Если же есть необходимость отразить конкретную область применения линей-

ного электродвигателя или режим его работы, то в названии должен быть отражен и этот фактор. Например, линейный электромагнитный вибродвигатель, линейный электромагнитный ударный двигатель и т.д.

Следует особо подчеркнуть, что до настоящего времени нет установившихся терминов, отражающих название линейных электрических двигателей по принципу действия. Об этом свидетельствуют работы [5; 8; 10; 12; 28; 33].

Даже применительно к одним и тем же по принципу действия и назначению устройствам (электромагнитным приводам к масляным выключателям) употребляются различные термины – электромагнитный и соленоидный [283].

Аналогом линейного электромагнитного двигателя в электрических машинах вращательного движения является реактивный двигатель с пассивным (невозбуждаемым) ротором [284].

Однако, несмотря на то, что теория работы этих двигателей разработана в большей степени, чем теория линейных электромагнитных двигателей, их терминология не является в настоящее время установившейся и однообразной. Ранее эти двигатели назывались «синхронные двигатели без возбуждения», затем «реактивные двигатели», «параметрические», «синхронные реактивные двигатели», «двигатели магнитного сопротивления» [280].

Применительно к линейным электромагнитным двигателям, на наш взгляд, наиболее приемлемым является обобщенное название «реактивный двигатель», так как оно достаточно точно характеризует принцип работы этих двигателей. В таких двигателях питание осуществляется только со стороны статора, а тяговое усилие возникает за счет магнитной несимметрии якоря. В частном случае, когда якорь линейного электромагнитного двигателя совершает возвратно-поступательное движение синхронно с основной волной поля, создаваемого обмоткой возбуждения статора, то их следует называть синхронными (ЛСРД).

Современное определение электропривода как комплекса устройств, включающих электродвигатель, передаточный механизм к рабочей машине и аппаратуру для управления двигателем [285], недостаточно полно определяет условия работы машин с электроприводами, так как исключает из рассмотрения рабочую машину. На это неоднократно указывали ряд исследователей [286; 287]. Это замечание приобретает еще более важное значение для импульсных линейных электроприводов и особенно электромагнитных, параметры которых сильно зависят от характера нагружения [31; 288]. В связи с отсутствием в государственном стандарте определения «импульсный линейный электромагнитный привод» нами предложено его определение как электропривода, электродвигательным устройством которого является импульсный линейный электромагнитный двигатель.

Достаточно полно определяет условия работы машин с импульсным линейным электромагнитным приводом силовая электромагнитная импульсная система (СЭМИС), генерирующая импульсы силы определенной частоты и ин-

тенсивности и включающая в качестве основных структур кроме импульсного линейного электромагнитного привода технологический объект, состоящий из рабочей машины и обрабатываемой среды [289; 290].

Рассмотрим обобщенную структуру СЭМИС. В общем случае в состав структурной схемы СЭМИС входят преобразователи энергии – электрический, электромеханический и механический, образующие энергетический (или силовой) канал, и устройства управления преобразуемой энергией, составляющие информационный канал.

В обобщенном виде структурная схема (рис. 1.8) содержит участок распределительной сети РС, электрический преобразователь ЭП, электромагнитный преобразователь ЭМП, передаточный механизм ПМ, рабочую машину РМ или один (несколько) ее рабочих органов РО.

Охарактеризуем роль и место каждого структурного элемента СЭМИС. Двухнаправленные стрелки на рис. 1.8 отражают тот факт, что энергия между двумя структурными элементами может передаваться в общем случае в любом направлении.

Участок распределительной сети РС является первым элементом энергетического (силового) канала, служащим для подвода электроэнергии. Параметры РС влияют на характеристики подводимого напряжения (симметрию, изменение напряжения при изменении потребляемого тока), что влияет на режим работы последующих элементов силового канала, в свою очередь, элементы силового канала влияют на режим и потери энергии РС. Особое значение такого взаимовлияния следует учитывать при питании СЭМИС от источников ограниченной мощности ввиду необходимости согласования внутренних сопротивлений источника питания ИП и электромагнитного преобразователя ЭМП.

Электрический преобразователь ЭП служит для преобразования переменных, характеризующих поступившую на его вход электрическую энергию к необходимой дискретной форме последующего преобразования ее в механическую работу ЭМП.

Он согласует частоты, фазы напряжений и токов первичного источника электрической энергии и входа ЭМП, а также изменяет их в соответствии с управляющими сигналами, управляя уровнями и направлениями потоков энергии к электромеханическому преобразователю ЭМП. Используемый в СЭМИС электромеханический преобразователь электромагнитного типа осуществляет основную энергетическую функцию системы – преобразует электроэнергию в механическую энергию, задает характеристики механического движения рабочей машины (РМ) или рабочего органа (РО) и переменные, определяющие это движение: движущие силы, линейную скорость, необходимые на рабочем органе машины.

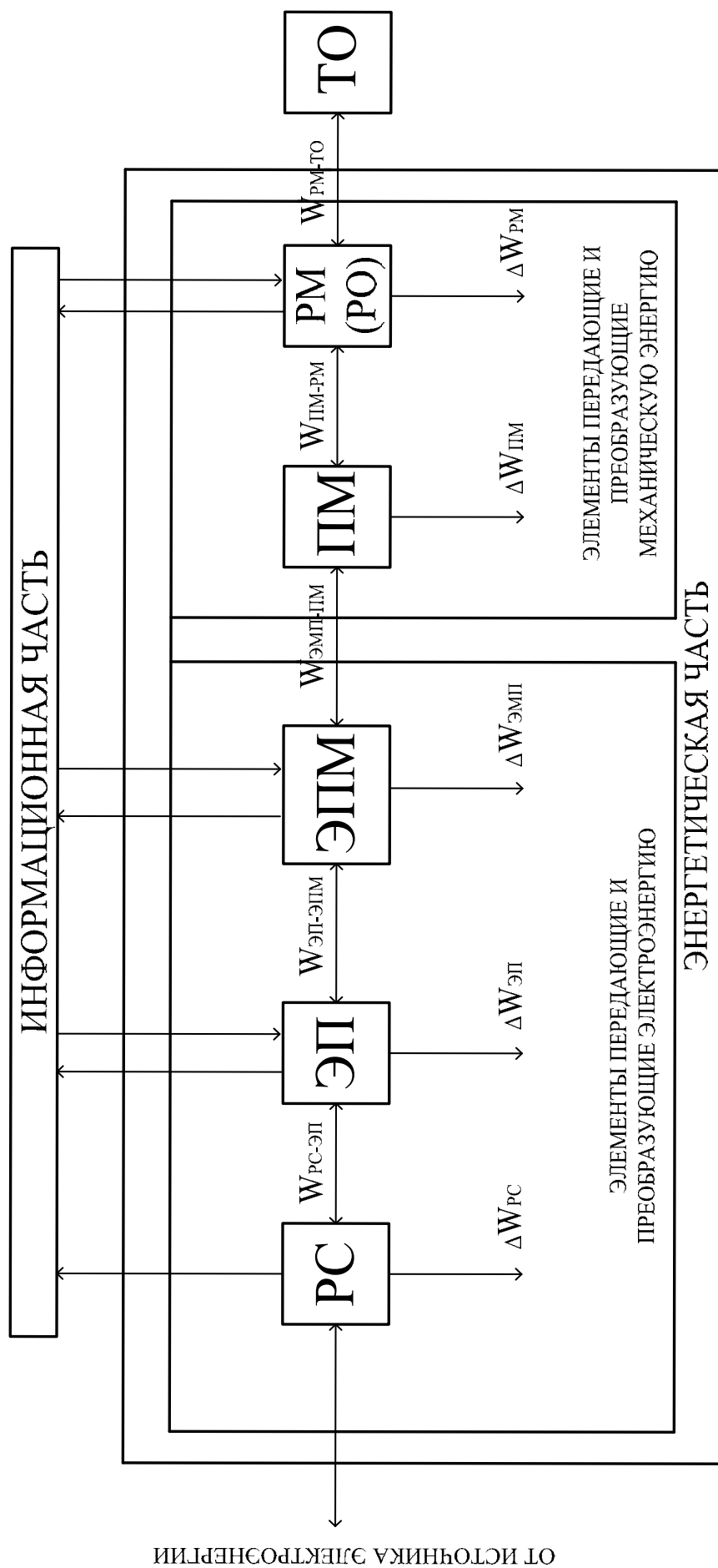


Рис. 1.8. Структурная схема СЭМИС

Передающий механизм (ПМ) представляет собой механическое, гидравлическое или другое устройство, предназначенное для передачи механической энергии к рабочему органу машины, согласования характеристик движения якоря ЭМП и РО.

Для СЭМИС характерна интеграция узлов энергетического канала, включая и рабочую машину, якорь ЭМП может быть одновременно рабочим органом машины, например, поршнем в компрессоре, насосе, пуансоном и вентилятором в прессе. В некоторых типах СЭМИС ввиду отсутствия рабочей машины на технологический объект, например, обрабатываемую среду, воздействует исполнительный орган. В электромагнитных ударных машинах таким органом, передающим механическую энергию от бойка к обрабатываемой среде, является пика, шлямбур и т.д. Источник электрической энергии, технологический объект ТО (обрабатываемая среда), информационная система о состоянии ТО в состав СЭМИС не входят, являясь сопредельными областями, однако оказывают существенное влияние на выбор отдельных элементов системы, режимы работы.

Следует отметить, что для импульсных ЛЭМД характерно использование многих терминов электрических машин вращательного движения: статор, якорь, полюсное деление и т.д. Однако специфичность конструкции ЛЭМД определила появление и некоторых специальных терминов, используемых для обозначения отдельных конструктивных элементов, узлов, например, «якорь», «плунжер», «боек», «бегун» [10; 31; 280]. Ввиду отсутствия установившегося термина в данной работе применяется общее понятие «подвижная часть», а также термин «боек» – для машин ударного действия.

Часто употребляемые термины «электромагнитный ударный механизм» и «электромагнитная ударная машина» по существу представляет собой интегрированные системы из импульсного ЛЭМД, рабочего инструмента и источников питания. Как отмечено в [291], с точки зрения современного толкования термина «механизм» электромагнитный ударный механизм не является механизмом как таковым, так как в нем нет преобразования движения одного твердого тела в требуемое движение других твердых тел. Однако в специальной литературе этот термин получил широкое распространение. Следует иметь в виду, что в теории механизмов и машин его содержание часто менялось по мере появления новых механизмов.

Нередко употребляемый в специальной литературе, посвященной импульсным электромагнитным машинам, термин «электромагнитный ударный узел», по существу, включает в себя устройства рабочего и обратного хода вместе с буферными устройствами, бойк [28; 31; 291].

1.3. ПРИНЦИПЫ КЛАССИФИКАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Многочисленные публикации и обширная патентная литература по импульсным ЛЭМД свидетельствует о большом количестве конструкций двигателей, существенно отличающихся друг от друга.

В связи с этим возникает необходимость в классифицировании ЛЭМД, позволяющая выявить как сходства, так и отличия конструкций этих двигателей, наметить пути их совершенствования и конкретизировать задачи исследования и разработки методик расчета параметров.

Существуют различные принципы классификации ЛЭМД [31; 292]. В работах [28; 31; 280; 292] рассмотрена система классификационных признаков ЛЭМД, отражающая их конструктивные, эксплуатационные свойства, область применения, устройства питания и управления ими, характер нагружения. Выбор классификационных признаков синхронных двигателей колебательного движения, среди которых значительную часть составляют ЛЭМД [280], осуществлен так, чтобы имелась возможность наиболее полно отразить эксплуатационные и конструктивные свойства всей совокупности двигателей. Обширная информация об этих свойствах получена на основе анализа энергетических схем отдельных частей двигателя: электрической, магнитной, механической.

В основу предлагаемой классификации импульсных ЛЭМД положены принципы, когда фиксируются признаки, имеющие принципиальное значение для расчета, способов питания и управления, области применения двигателей этого класса.

Наиболее общими признаками классификации ЛЭМД являются принципы формирования тягового усилия. Их можно установить из общего выражения электромагнитного усилия $F_3 = \int_0^i \frac{d\psi}{dx} di$, где ψ - потокосцепление; i - ток в обмотке; x - координата положения якоря ЛЭМД.

Для создания тягового усилия необходимо, чтобы в конструкции ЛЭМД могло изменяться по координате положение якоря x связанное с ним потокосцепление ψ , которое для ненасыщенной магнитной цепи можно определить как $\psi = Li$, где $L = \mu \cdot w^2 \cdot s / \delta$ - индуктивность системы; μ , s , δ - соответственно магнитная проницаемость, площадь и длина рабочего зазора; w - количество витков обмотки.

Таким образом, в общем случае в зависимости от конструкции магнитной системы ЛЭМД при перемещении якоря возможно изменение одного из параметров μ , s , δ , w или одновременно нескольких. Соответственно тому или иному способу формирования тягового усилия можно классифицировать ЛЭМД на двигатели с продольным магнитным полем, поперечным, на потоках рассеяния, с переменной магнитной проницаемостью, двигатели смешанного

типа. ЛЭМД разных типов различаются видом тяговых характеристик, предельными значениями перемещений и сил, что и определяет их рациональную область применения.

По отношению рабочего хода якоря к длине ЛЭМД эти двигатели разделяются на короткоходовые и длинноходовые. В короткоходовых ЛЭМД ход якоря x примерно в два раза меньше величины полного рабочего воздушного зазора δ , в длинноходовых - $x \approx \delta$ [146]. Для длинноходовых ЛЭМД по [152] $\frac{x}{d} < 5$, по [190] $\frac{x}{l_0} = 0,2 \dots 0,6$. Здесь d - диаметр якоря, l_0 - длина обмотки.

Короткоходовые ЛЭМД работают на основном магнитном потоке, который замыкается через полюса с якорем, а длинноходовые - на потоках рассеяния, которые замыкаются с якорем через окно обмотки. Соответственно двум типам ЛЭМД их электромагнитная сила определяется на основе двух физических явлений: притяжением одного ферромагнитного тела к другому при наличии магнитного поля между ними и взаимодействием тока обмотки с полем магнитной системы [145].

Проанализируем возможности каждой из этих двух электромагнитных систем в совершении механической работы. Для короткоходового электромагнита сила тяги может быть определена по формуле Максвелла [166] $F_3 = 4,06 \cdot B^2 \cdot S$, где B - магнитная индукция в зазоре; S - площадь поперечного сечения зазора. Тогда удельная сила притяжения для короткоходового ЛЭМД будет $f_3 = 4,06 \cdot B^2$. Анализ кривых намагничивания наиболее распространенных ферромагнитных материалов [294] показывает, что независимо от величины МДС максимальная теоретически достижимая удельная сила притяжения для лучших сортов магнитомягкого железа (при индукции насыщения 2,5 Тл) не превосходит 220 Н/см². Реальное предельное усилие, приходящееся на единицу площади сечения якоря при индукции в зазоре $B = 1 \dots 2$ Тл составляет 40...160 Н/см². Так как максимальная удельная сила в короткоходовых ЛЭМД будет наблюдаться в конце хода якоря, то величина хода в этих магнитных системах ограничена.

Следует отметить, что рабочий воздушный зазор δ не оказывает непосредственного влияния на удельную силу притяжения. Однако с увеличением зазора δ трудно получить магнитный поток с большой индукцией. Таким образом, величина совершаемой механической работы для короткоходовых электромагнитов будет практически ограниченной.

В длинноходовых ЛЭМД сила тяги определяется по формуле:

$$F_3 = 1,02 \cdot H \cdot \Phi_{\nu},$$

где H - напряженность магнитного поля; Φ_{ν} - поток рассеяния. Это выражение можно представить в виде $F_3 = 1,02 \cdot I \cdot w \cdot B \cdot S / l_0$, где B - индукция в якоря,

соответствующая воротничку; S - сечение якоря. Удельная сила тяги при этом будет

$$f_{\text{с}} = 1,02 \cdot J \cdot w \cdot B \cdot S / I_0.$$

Анализ этого выражения показывает, что удельная сила тяги длинноходового ЛЭМД зависит от магнитной индукции и тока в обмотке. При достижении величины индукции насыщения удельная сила тяги пропорциональна току в обмотке. Благодаря этой особенности в двигателях такого типа могут быть достигнуты большие усилия при применении теплостойких обмоточных материалов и интенсифицированных систем охлаждения. Учитывая также при этом большие перемещения, можно сделать вывод, что по совершаемой работе длинноходовые ЛЭМД могут превосходить все остальные типы ЛЭМД и, следовательно, могут быть использованы в приводе мощных импульсных машин.

В ЛЭМД смешанного типа характерно формирование тягового усилия за счет нескольких магнитных потоков, например, основного и потоков рассеяния. По значениям тяговых усилий, перемещений, совершаемых работ эти двигатели занимают промежуточное положение между коротко- и длинноходовыми ЛЭМД.

Режим работы ЛЭМД может быть синхронным (частота колебания якоря равна частоте сети или кратна ей); автоколебательным (частота и величина перемещения якоря определяет частоту и длительность протекания тока в катушках); резонансным (при равенстве частоты собственных механических колебаний якоря и частоты тока, питающего двигатель).

По использованию обмоток ЛЭМД можно классифицировать на электрически односторонние, электрически двухсторонние и резонансные.

У электрически односторонних ЛЭМД перемещение якоря в одну сторону осуществляется электромагнитными силами обмотки или системой обмоток, а в другую - только упругими силами демпферного устройства.

У электрически двухсторонних ЛЭМД перемещение якоря в обе стороны осуществляется только электромагнитными силами обмоток, или к электромагнитным силам добавляются упругие силы демпферных устройств, которые являются реактивной механической нагрузкой. В зависимости от характера активной механической нагрузки они могут быть установлены с двух сторон или с одной стороны.

Резонансный двигатель имеет одну обмотку, которая электромагнитными силами совершает перемещение якоря из любого крайнего положения до положения магнитного равновесия (среднего положения) системы. От положения магнитного равновесия в крайние положения якорь перемещается под действием накопленной кинетической энергии. Возможны конструктивные решения, когда при движении якоря к положению магнитного равновесия к электромагнитным силам добавляются упругие силы демпферных элементов, которые являются реактивными механическими нагрузками.

Кроме того, у перечисленных типов ЛЭМД действие электромагнитной силы за время одностороннего перемещения якоря может быть одноимпульсным, двухимпульсным и многоимпульсным. Питание ЛЭМД может быть переменным током, пульсирующим или постоянным.

Частота колебаний якоря электрически одностороннего ЛЭМД возвратно-поступательного движения, работающего от сети переменного тока, составляет $n = 2 \cdot 60f$ колебаний в минуту; при питании катушки по однофазной однополупериодной схеме $n = 60f$; при питании через синхронные переключатели $n = 60f / p$, где f - частота сети, Гц; p - число периодов напряжения, используемых для совершения одного полного цикла движения якоря.

Частота колебаний якоря электрически двухстороннего ЛЭМД возвратно-поступательного движения, работающего от сети переменного тока, при питании катушек по однофазной однополупериодной схеме выпрямления и через синхронные переключатели определяется по вышеуказанным выражениям. Аналогично определяется частота колебаний резонансного ЛЭМД, работающего от сети переменного тока, при питании по однофазной однополупериодной схеме и через синхронный переключатель. В случае переключения питания двигателей от положения якоря частота колебаний зависит от величины активной и реактивной механической нагрузки, электромагнитных сил, величины перемещений якоря и т.п. Частота колебаний якоря ЛЭМД при его питании от схем с заданной программой определяется задающими устройствами. В некоторых машинах возвратно-поступательного движения предъявляются требования к величине хода якоря, работающего на заданную нагрузку (например, компрессор, насос), т.е. когда необходимо строго выдержать величину хода якоря независимо от изменения напряжения сети, частоты колебаний, а также изменения нагрузки. В этом случае целесообразно использовать переключающие устройства, работающие на принципе заданной интегральной работы за одно перемещение якоря:

$$A = \int_0^{\delta} F_n d\delta = kA_n = \text{const},$$

где F_n - сила, противодействующая перемещению якоря; A_n - полезная работа за перемещение якоря; k - коэффициент, пропорциональный КПД установки.

В случае, когда якорь перемещается в пределах ширины полюса, двигатель работает с незамкнутой магнитной системой подобно электродинамическим и магнитоэлектрическим двигателям с половинным использованием магнитного потока; когда перемещение якоря больше ширины полюса за время рабочего цикла, магнитная цепь разрывается.

Электромагнитный двигатель может работать с перемагничиванием и без перемагничивания якоря за время одного цикла. В случае перемагничивания полезная работа возрастает, увеличивается и энергия, потребляемая из сети, по сравнению с режимом, когда двигатель работает без перемагничивания. Однако

однозначно нельзя сказать о КПД, который зависит от соотношения величины полезной работы и энергии, потребляемой из сети, для каждого режима.

По конструктивному исполнению электромагнитный двигатель может быть плоским (прямоугольным) или трубчатым (круглым). Независимо от формы конструкции необходимо достигать полной симметрии магнитного потока по оси перемещения якоря, в ином случае создаются радиальные электромагнитные силы, которые приводят к увеличению потерь на трение.

Особенностью работы ЛЭМД является значительная зависимость динамических, в частности, энергетических параметров от условий нагружения со стороны приводимого в движение механизма.

В работе [288] указывается на существенную зависимость реальной работоспособности приводного электромагнита от условий его нагружения. Этим объясняется то, что, как правило, ЛЭМД проектируются и выпускаются для конкретного устройства, их конструкция приспособляется к требованиям конкретного привода. Исключение представляют, например, ЛЭМД, предназначенные для установок технологического вибрирования. В этом случае возможно применение ЛЭМД в различных устройствах, и их можно рассматривать как автономные двигатели.

Характер нагружения ЛЭМД за время рабочего хода определяет также и особенности методики их расчета.

По приложению нагрузки за время рабочего цикла ЛЭМД разделяются на двигатели:

а) с одно- и двухсторонней нагрузкой, приложенной на части рабочего хода (в приводе прессов) или на большей части рабочего хода (в приводе компрессоров, насосов);

б) с одно- и двухсторонней ударной нагрузкой, приложенной в конце хода якоря (машины ударного действия).

По характеру приложенной нагрузки ЛЭМД разделяются на двигатели ударной, «компрессорной», «насосной» нагрузки и статической нагрузки (прессы, толкатели).

По величине полезной мощности ЛЭМД целесообразно разделить на маломощные (до 0,1 кВт), средней мощности (0,1..2 кВт) и мощные (более 2 кВт).

К маломощным относятся ЛЭМД электробритв, лобзиков, компрессоров микрокриогенной техники, пил и т.д.

К ЛЭМД средней мощности относятся двигатели ручных машин ударного действия, настольных прессов, насосов, вибраторов различного назначения, смесителей, перемешивающих устройств, робототехнических комплексов, дозаторов, нагнетателей.

К мощным относятся ЛЭМД машин ударного действия для бурения скважин больших диаметров, забивки свай, обсадных труб и заземлителей,

вибропрокладки кабелей, труб, вибровыпуска руды, сейсморазведки, штамповки, обрубки, дробления негабаритов, крепких материалов, бетонных и кирпичных кладок, разрушения горных пород, угля, мерзлого грунта, уплотнения грунта, вибротранспортеры и вибропитатели большой производительности, смесители (активаторы) для ускорения химических процессов и обогащения полезных ископаемых, приводы виброформ для литья и т.д.

Возможна классификация и по другим признакам, затрагивающая исполнение отдельных конструктивных элементов ЛЭМД, способов охлаждения, питания и управления и т.д. [292]. Представляет интерес подробная классификация ЛЭМД в условиях конкретного применения, например, в прессовом оборудовании [10]. Анализ изложенных принципов классификации показывает, что ЛЭМД имеет около тысячи разнообразных конструктивных схем, форм, исполнений и развитие их продолжается.

Рассмотренные классификационные признаки импульсных ЛЭМД в той или иной мере определяют их конструктивные, эксплуатационные свойства, экономические показатели, область применения. Это позволяет проводить предварительную оценку свойств двигателей по различным классификационным признакам [280]. Однако, как отмечает профессор С.Ю. Кудараускас, различные классификационные признаки по-разному, часто противоречиво, влияют на свойства двигателя и поэтому не представляется возможным заранее выбрать их оптимальную совокупность. В каждом конкретном случае выбор варианта ЛЭМД, его компоновки, отдельных конструктивных элементов должен проводиться исходя из требований технологического процесса, технико-экономических условий.

1.4. ОБЛАСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИН С ЛЭМД

Среди машин с ЛЭМД наиболее раннее развитие получили ручные ударные машины. Отличительной особенностью конструкций ручных электромагнитных машин прямого действия от электромеханических является отсутствие преобразователей движения. В этих устройствах в качестве привода используется линейный электрический двигатель возвратно-поступательного движения, служащий возбудителем ударных импульсов. Их существенным преимуществом по сравнению с электромеханическими машинами такого типа является наличие встроенной системы пассивной виброизоляции с «подвешенным» ударным узлом и инерционным преобразователем импульса сил.

Использование электромагнитного двигателя возвратно-поступательного действия позволяет конструктивно наиболее просто реализовать вибробезопасность, стабильность энергии удара и независимость ее от изменения скорости вращения инструмента, возможность независимого регулирования энергии удара и скорости вращения инструмента, обеспечение трех режимов работы

перфораторов (удар с вращением, вращение без удара, удар без вращения), придающих машине многофункциональные свойства.

Практическое промышленное использование электромагнитных ударных машин началось с 1923 г., когда фирмой «National Electric» (США) было освоено серийное производство электромагнитных молотков «Sintron». В 1929 г. выпуск подобной продукции осуществлялся в ФРГ (молотки АЕГ, BEWI) и Италии (молоток SIMBI). Недостатками электромагнитных молотков были низкая надежность из-за подгорания силовых контактов механических прерывателей и продолжительность включения. Диапазоны изменения удельной энергии удара и удельной ударной мощности у электромагнитных молотков в тот период составляли соответственно 0,24..0,5 Дж/кг и 5..9 Вт/кг [26; 67].

Применение полупроводниковых выпрямителей позволило существенно улучшить параметры электромагнитных машин, создать новые схемы их питания, предложить новые рабочие процессы. В этот период удельная энергия удара электромагнитных молотков возросла до 0,7 Дж/кг, а удельная ударная мощность достигла 18,3 Вт/кг.

Несмотря на повышение уровня технических показателей электромагнитных ударных машин и продолжительность их выпуска (электромагнитные молотки «Sintron» выпускались более 25 лет), в пятидесятые годы зарубежные фирмы практически прекратили выпуск электромагнитных ударных машин и исследования возможностей их усовершенствования, уделяя основное внимание электромеханическим машинам с приводами вращения.

По нашему мнению, объясняется это следующими обстоятельствами. К указанному времени технический уровень электромеханических машин с компрессионно-вакуумной связью стал удовлетворять рынок, что было достигнуто за счет разработки рациональных конструктивных схем, параметров, режимов работы и высокого уровня технологии изготовления машин.

В то же время электромагнитные машины ударного действия по продолжительности включения, удельной ударной мощности и КПД уступали электромеханическим машинам. Не был решен и ряд вопросов, связанных с надежностью, электро- и вибробезопасностью. Стало ясно, что для повышения продолжительности включения необходимо интенсифицировать теплоотвод с помощью дополнительного электродвигателя, что привело к созданию двухдвигательной схемы конструкции машины, а это снизило эргономические показатели в целом.

Несмотря на это, в Томском политехническом институте с середины 50-х годов стали проводиться интенсивные работы по совершенствованию электромагнитных ударных машин. В результате этих работ были существенно улучшены основные показатели машин, которые превзошли аналогичные показатели электромагнитных машин иностранных фирм включая машины лидера этого направления - фирмы «National Electric». Удельная энергия удара электромагнитных молотков в это время достигала 0,73..1,0 Дж/кг, а удельная мощность 15..26 Вт/кг. Однако потребовалось значительное время, чтобы парамет-

ры разрабатываемых молотков и перфораторов стали удовлетворять требованиям серийного производства.

С 1972 г. благодаря глубоким научным исследованиям, проводимым в Институте горного дела СО АН СССР, а также совместным опытно-конструкторским работам с ВНИИСМИ и Даугавпилским заводом «Электроинструмент», электромагнитные молотки и перфораторы стали выпускаться серийно. С 1966 г. по разработкам ИГД СО РАН на Саратовском заводе «Электродеталь» стал выпускаться электромагнитобур СЦ-2, положивший начало производству перфораторов. Еще ранее там же был начат выпуск молотка МС-18/36М - «Дятел-2».

К настоящему времени удельные энергетические показатели выпускаемых серийно электромагнитных ударных машин достигли следующего уровня: удельная энергия удара составляет 0,53...1,7 Дж/кг, а удельная ударная мощность - 26,9...38,8 Вт/кг (табл. 1.2).

Удельная энергия удара у разрабатываемых электромагнитных машин нового поколения (табл. 1.2) достигает значения 2,5 Дж/кг, удельная ударная мощность - 50 Вт/кг [72; 73]. Современные серийные электромагнитные молотки и перфораторы имеют удельную энергию удара, равную 0,37...0,78 Дж/кг, удельную ударную мощность - 20,8...38,8 Вт/кг.

Следует отметить некоторое изменение отношения разработчиков ручных электромагнитных ударных машин к величине КПД машин. Одним из основных показателей ручных ударных машин является их масса, существенно зависящая от массы активных материалов приводных электродвигателей, а стремление снизить массу двигателей ударных узлов приводит к снижению КПД. Диапазон значений КПД ручных серийных электромагнитных ударных машин составляет 0,28..0,375 при максимальной величине этого показателя 0,45 [63].

Актуальность проблемы повышения удельных энергетических показателей ручных электромагнитных ударных машин подтверждает и анализ патентной литературы за последние десять лет. Так, из двухсот патентов и авторских свидетельств, относящихся к обсуждаемой проблеме, более шестидесяти посвящено вопросу повышения удельных энергетических показателей. В ближайшие 10-15 лет проблема повышения удельных энергетических показателей ручных электромагнитных машин ударного действия будет решаться преимущественно путем создания новых конструктивных схем, а не за счет использования новых активных материалов (сверхпроводящих материалов для изготовления обмоток и новых ферромагнитных материалов с индукцией насыщения, превосходящей в несколько раз значение этого параметра у используемых материалов).

Таблица 1.2

Основные показатели ручных электромагнитных ударных машин прямого действия

Тип машины	Фирма, предприятие изготовитель, страна	Энергия удара	Частота ударов максимальная	Масса	Потребляемая мощность	Ударная мощность	Удельная энергия удара	Удельная ударная мощность	Тип электродвигателя	Назначение	
		Дж	мин ⁻¹	кг	Вт	Вт	Дж/кг	Вт/кг			
ИЭ4219	ТЭМЗ, г.Томск	0,7	3000	1,2	80	35	0,58	29,1	ЭМ	М	
ИЭ 4240	Завод «Электроинструмент», Латвия	0,7	3000	1,3	100	35	0,53	26,9	ЭМ	М	
ИЭ 4207		4,5	3000	6,9	630	225	0,64	32,7	ЭМ,	М	
ИЭ 4210		6,3	3000	8,1	700	310	0,78	38,8	ЭМ	М	
ИЭ 4214		25	1000	14,5	1600	420	1,7	30,0	ЭМ	М	
ИЭ 4709		2,5	3000	6,0	650	125	0,41	20,8	ЭМ,	П	
ИЭ 4724		2,5	3000	5,5	800	125	0,45	22,7	К	П	
СЦ-2		З-д «Электродеталь», г. Саратов	4,5	3000	10,0	1000	225	0,45	22,5	ЭМ, К	П
ИЭ 4720	DauER, Латвия	1,0	3000	2,7	550	50	0,37	18,5	ЭМ,	П	
ERP-1000		3,0	3000	5,8	1010	150	0,52	25,8	К	П	
ТТ-312	ПО«Север», г. Новосибирск	2,3	6000	3,6	750	76	0,64	21,2	ЭМ, К	П	
Перспективные модели	1.5Дж	ИГД СО РАН, г. Новосибирск	1,5	3000	2,5	300	75	0,6	30	ЭМ	М
	2.0Дж		2,0	1980	3,8	250	66	0,52	17,36	ЭМ	М
	2.5Дж		2,5	3000	5,0	650	125	0,5	25,0	ЭМ	М
	5.0Дж		5,0	3000	7,0	850	250	0,71	35,7	ЭМ	М
	6.0Дж		6,0	3000	6,0	600	300	1,0	50,0	ЭМ,	П
	25Дж		25	1000	18,0	1800	415	1,38	23,0	ЭМ, К	П
	15Дж		15	1500	12,0	1400	375	1,2	31,0	ЭМ, К	П
	50Дж		50	750	20,0	1600	625	2,5	31,2	ЭМ	М

ЭМ - электромагнитный двигатель; К - коллекторный двигатель; М - молоток; П - перфоратор

Существенные результаты в развитии теории энергопреобразования, расчетов и конструирования ЛЭМД, полученные в Институте горного дела СО РАН совместно с другими организациями, позволили расширить области применения машин с импульсными ЛЭМД.

В период 1981-1985 г. разработан, изготовлен и испытан ряд установок с мощными электромагнитными машинами ударного действия (молотами), совместно с Братским специализированным управлением создана установка с электромагнитным молотом для разрушения футеровки катодов алюминиевых электролизеров с энергией удара до 10 кДж и потребляемой мощностью 42 кВт [58]. При указанной мощности масса бойка-якоря при этом составила 810 кг при общей массе двигателя привода 2,2 т. На базе дизель-электрического трактора ДЭТ-250 создана мобильная установка с электромагнитным молотом для разрушения негабаритов с энергией удара до 7,5 кДж [12]. В этот же период проходили испытания электромагнитные молоты с энергией единичного удара до 30 кДж, предназначенные для морского гидротехнического строительства. Привод имел максимально простую конструкцию, выполненную по схеме молота двойного действия, и при общей длине двигателя 6 м его масса составляла 7 т [49]. В 1990 г. при участии СКБ Прикладной геофизики СО АН СССР проводились промышленные испытания электромагнитного молота с энергией удара 100 кДж. Технические показатели молотов с ЛЭМД приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Технические показатели молотов с ЛЭМД

Показатели	Тип молота					
	ЭМ-250	ЭМ-5У2	ЭМ-600	ЭМ-1000	ЭМ-3000	ЭМ-10000
Энергия удара, Дж	340	2000	6000	10000	27000	100000
Частота ударов, уд/мин	150	90	100	85	75	25
Ударная мощность, кВт	0,83	2,94	9,8	13,8	33	40
Потребляемая мощность, кВт	9	12	35	47	90	250
КПД, %	9,2	24,5	28	29,4	36,7	25
Масса, кг	145	455	1850	2700	5000	18600
Удельная полезная мощность, Вт/кг	5,7	6,46	5,3	5,1	6,6	2,1
Удельная энергия удара, Дж/кг	2,34	4,4	3,24	3,7	5,4	5,3

Принципиальным отличием рассмотренных устройств стало применение в них конструктивной схемы молота простого действия с секционированной катушкой, обладающей возможностью поочередного включения секций [50; 51]. Это привело к снижению общей массы привода по сравнению с массой привода при использовании молота двойного действия. Перспективно применение молотов с другими выходными параметрами для реализации различных импульсных технологий.

Для механизации операций с использованием пластической деформации (вырубка, пробивка, гибка, запрессовка, расклепка, развальцовка и др.) эффективно применение прессового оборудования с импульсным ЛЭМД, технические показатели которых приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Технические показатели прессового оборудования с ЛЭМД

Показатели	Тип пресса					
	ПЭМ-0.1	ПЭМ-0.2	ПЭМ-0.3	ПЭМ-0.5	ПЭМ-1.0	ПЭМ-3.0
Номинальная сила давления, кН	1	2	3	5	10	30
Сила удара, кН	3	6	10	18	25	67
Ход ползуна, м·10 ⁻²	2	2,5	3	3,5	3,5	5.0
Частота ходов, ход/мин	300	300	300	250	200	200
Полезная работа, Дж	3,0	5	7	12	20	100
Полезная мощность, Вт	14	24	34	49	65	327
Потребляемая мощность, Вт	46	80	110	180	300	700
КПД, %	30,4	30	31	27,2	22	46,7
Масса, кг	5,0	8	16	20	30	150
Удельная сила давления, Н/кг	200	250	187,5	250	333	200
Удельная сила удара, Н/кг	600	750	625	900	833	447
Удельная полезная работа, Дж/кг	0,5	0,625	0,44	0,6	0,66	0,66
Удельная полезная мощность, Вт/кг	2,8	3,0	2,13	2,45	2,17	2,18

Опыт использования прессов с ЛЭМД свидетельствует об их высокой надежности, экономичности, производительности, простоте эксплуатации. Вопрос о рациональной области использования электромагнитных прессов должен решаться на основе всестороннего сравнения с прессами других типов по ряду показателей, однако особенно эффективным является применение электромагнитных прессов в диапазоне усилий до 160...180 кН, где их относительная масса K_M , представляющая отношение массы пресса к номинальному усилию, не выше, чем у кривошипных и пневматических (рис. 1.9), что позволяет существенно снизить расход металла на изготовление пресса.

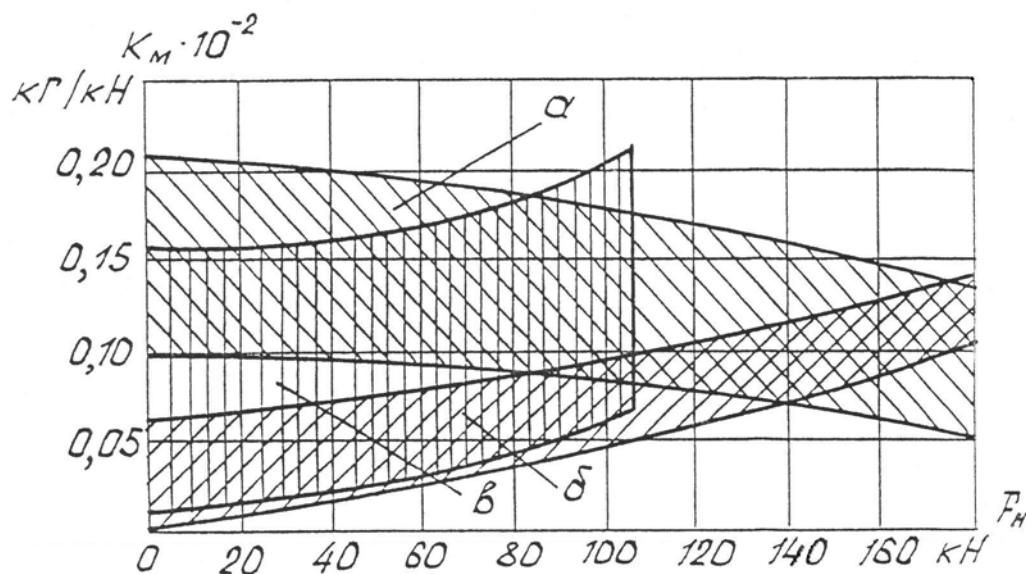


Рис. 1.9 Диапазон изменения относительной массы прессов:
 α – кривошипные, β – электромагнитные, δ – пневматические

Эффективно использование ЛЭМД в приводе насосов, компрессоров, вибрационных и испытательных установках. Технические характеристики таких машин приведены в табл. 1.5.

Обзор и анализ развития электромагнитного привода линейных машин [6; 10; 26; 46] позволяет сделать вывод, что для него не достигнута стабилизация показателей эффективности, служащая признаком возникновения тенденции перехода к новым машинам.

Технические показатели вибрационных машин с ЛЭМД

Показатели	Тип вибрационных машин			
	Насосы НЭБ 1/20	Компрес- соры	Вибраторы для техноло- гических про- цессов	Испыта- тельная уста- новка
Тяговое усилие, Н	$3 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$	10^4	10^5
Перемещение якоря, м	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$
Частота ходов, Гц	50	50	50	$6 \cdot 10^2$
Полезная работа, Дж	3,4	5	60	-
Полезная мощность двигателя, Вт	165	245	300	-
Потребляемая мощность, Вт	220	445	600	$2 \cdot 10^3$
КПД, %	75	55	50	-
Масса установки, кг	6,5	8	100	1000
Удельная полезная работа, Дж/кг	0,49	0,63	0,6	-
Удельная полезная мощность, Вт/кг	23,6	30,6	3	-
Удельная сила тяги, Н/кг	43	25	100	100

За время своего развития и совершенствования ЛЭМД заняли прочное место в приводе различных машин, механизмов и их рабочих органов, зарекомендовав себя как эффективные и высокопроизводительные устройства. Накопленный опыт разработок и эксплуатации ЛЭМД, а также постоянное совершенствование их конструкций, устройств питания и управления и методов оптимизации параметров дают основание утверждать, что использованы еще не все резервы их возможностей и областей применения, что позволяет отнести их к прогрессивным и перспективным видам электрооборудования. Большие потенциальные возможности импульсных ЛЭМД будут раскрываться по мере развития электромашиностроения, полупроводниковой техники, материаловедения и других смежных отраслей электротехники. Благодаря этому будут полнее удовлетворяться требования, предъявляемые к ЛЭМД со стороны рабочих машин и технологического процесса.

1.5. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МАШИН С ЛЭМД

Перспективность машин с ЛЭМД подтверждается серийным выпуском электромагнитных перфораторов, молотков, насосов, сейсмоисточников, прессов и испытательных установок. Имеется большой положительный опыт создания и практического использования электромагнитных ударных машин для погружения свай, анкеров, труб при строительстве морских платформ, бурения скважин больших диаметров, дробления негабаритов, крепких искусственных материалов, уплотнения и зондирования грунта, взятия керна со дна моря, воздействия на нефтяную залежь, дозирования жидких сред и т.д. Дальнейшее применение электромагнитных ударных машин в традиционных и новых высокоэнергетических технологиях, используемых в строительстве, машиностроении и других отраслях, требует повышения их КПД, удельных энергетических показателей и надежности.

Анализ характеристик электромагнитных ударных машин, выпущенных за последние сорок лет, позволил оценить достигнутый уровень основных выходных показателей, тенденции их изменения и определить пути дальнейшего улучшения параметров машин. Для объективного анализа показателей электромагнитных ударных машин была использована отечественная и зарубежная информация о более чем 250 типоразмеров машин, приведенная в монографиях, статьях, каталогах, рекламных проспектах.

Для оценки технического уровня электромагнитных ударных машин была использована система общепринятых энергетических критериев, отраженных для каждого типа устройств в табл. 1.6, и проведен их анализ в соответствии с подходом, изложенным в [63].

Среди электромагнитных импульсных машин ударного действия можно выделить четыре основные группы устройств, классифицированных по признаку соответствия характеру выполняемых технологических операций.

К первой группе устройств отнесены ручные электромагнитные машины (молотки, перфораторы), частота ударов которых обычно синхронизирована с частотой питающей сети [5; 8; 26].

Вторую группу машин составляют в основном электромагнитные прессы ударного и прессового действия [10]. В третью и четвертую группу включены мощные ударные машины с энергией ударов соответственно до 1 кДж (переносные ударные комплексы) и более 1 кДж (молоты) [12; 14; 49; 50; 58; 60; 67; 74; 75].

Таблица 1.6

Технические показатели электромагнитных ударных машин

Показатель	Тип машины	Диапазон изменения значения показателя	Максимальное значение показателя
1	2	3	4
Энергия удара А, Дж	Перфораторы: однокатушечные	1,0..5,0	10,0
	двухкатушечные	2,5..5,0	15,0
	Молотки: однокатушечные	0,2..4,0	9,0
	двухкатушечные	0,9..15,0	20,0
	Бетоноломы	25,0..40,0	50,0
	Прессы	3,0..100,0	250,0
	Молоты до 1 кДж	150,0..250,0	400,0
Молоты более 1 кДж	1800,0..100000,0	400000,0	
Ударная мощность Р, Вт	Перфораторы: однокатушечные	50,0..125,0	250,0
	двухкатушечные	125,0..260,0	375,0
	Молотки: однокатушечные	18,7..100,0	220,0
	двухкатушечные	32,0..334,0	375,0
	Бетоноломы	417,0..625,0	1030,0
	Прессы	18,0..327,0	500,0
	Молоты до 1 кДж	500,0..800,0	2600,0
Молоты более 1 кДж	2250,0..40000,0	160000,0	
Коэффициент полезного действия η , отн. ед.	Перфораторы: однокатушечные	0,23..0,36	0,38
	двухкатушечные	0,30..0,31	0,40
	Молотки: однокатушечные	0,17..0,44	0,45
	двухкатушечные	0,28..0,40	0,45
	Бетоноломы	0,28..0,36	0,45
	Прессы	0,25..0,31	0,40
	Молоты до 1 кДж	0,09..0,40	0,46
Молоты более 1 кДж	0,16..0,29	0,38	
Удельная энергия удара $\frac{A}{M}$, Дж/кг	Перфораторы: однокатушечные	0,37..0,83	1,00
	двухкатушечные	0,41..0,86	1,25
	Молотки: однокатушечные	0,13..0,87	1,0
	двухкатушечные	0,23..1,55	2,2
	Бетоноломы	0,9..2,22	2,7
	Прессы	1,66..2,3	3,9
	Молоты до 1 кДж	1,25..3,90	5,0
Молоты более 1 кДж	2,0..5,56	6,4	

Продолжение табл. 1.6

1	2	3	4
Удельная ударная мощность $\frac{P}{M}$, Вт/кг	Перфораторы: однокатушечные двухкатушечные	17,6..25,0 20,8...33,0	30,0 35,7
	Молотки: однокатушечные двухкатушечные	5,4..24,3 5,9..49,0	25,0 50,0
	Бетоноломы	22,0..28,0	34,5
	Прессы	4,7..13,8	15,0
	Молоты до 1 кДж	2,5..7,8	32,5
	Молоты более 1 кДж	2,2..7,2	8,0
	Энергия удара, отнесенная к массе меди обмотки, $\frac{A}{m}$, Дж/кг	Перфораторы: однокатушечные двухкатушечные	3,3..5,5 2,7.. 4,5
Молотки: однокатушечные двухкатушечные		1,3..3,5 0,9..5,25	4,0 5,35
Бетоноломы		6,3	6,3
Прессы		10,4..16,6	19,2
Молоты до 1 кДж		5,7..19,2	30,7
Молоты более 1 кДж		8,3..25,8	30,3
Ударная мощность, отнесенная к массе меди обмотки, $\frac{P}{m}$, Вт/кг		Перфораторы: однокатушечные двухкатушечные	166,0..248,0 138,0..225,0
	Молотки: однокатушечные двухкатушечные	62,0..98,0 46,0..202,0	99,0 262,0
	Бетоноломы	104,0	104,0
	Прессы	23,0..71,4	100,0
	Молоты до 1 кДж	11,3..38,5	200,0
	Молоты более 1 кДж	11,1..21,5	24,0

Известно, что энергия удара является главным параметром машин ударного действия, определяющим интенсивность разрушения различных материалов. Современные импульсные электромагнитные машины имеют довольно широкий диапазон значений энергии удара: от десятых долей джоуля до нескольких сотен килоджоулей. Наименьшей энергией единичного удара характеризуются ручные машины с ЛЭМД однообмоточного типа. У молотков величина энергии единичного удара составляет 3...4 Дж. Более высокие показатели (4,5...6,3 Дж) имеют двухобмоточные ручные машины. У отдельных типовых размеров ручных молотков и перфораторов энергия единичного удара достигает максимального значения 15,0...20,0 Дж.

Из большого многообразия ручных машин следует выделить молотки фирм Sintron (США), AEG, BEWI, Миллерс-Фолс (Германия), SIMBI (Италия), которые при их серийном производстве первые применили в начале тридцатых годов прошлого века импульсные электромагнитные двигатели. Всего выпускалось более 15 типоразмеров машин, созданных преимущественно на базе двухобмоточных двигателей, с энергией единичного удара 0,9...5,0 Дж, однако широкого признания данный класс машин за рубежом не получил.

Анализ характеристик ручных электромагнитных ударных машин показывает, что устройства с двухобмоточными двигателями имеют более высокую величину энергии единичного удара. На базе двухобмоточных двигателей созданы серийно выпускаемые Даугавпилским заводом «Электроинструмент» (ныне фирма DauER) перфоратор ИЭ-4709, пришедший ему на смену перфоратор ИЭ-4724 и электромагнитный молоток ИЭ-4207 (табл. 1.6). В ряду ручных электромагнитных машин бетоноломов оказалось всего четыре типоразмера с энергией удара 25...40 Дж и максимальной энергией удара, равной 50 Дж. Несколько шире этот диапазон у прессов – 3...100 Дж.

Среди электромагнитных молотов выявлено 16 типоразмеров, большинство из которых выполнено по схеме молотов двойного действия с обмотками рабочего и холостого хода. В типоразмерах молотов до 1 кДж наиболее широкое применение получили конструкции с энергией удара 150...250 Дж, однако в отдельных типоразмерах этот показатель доведен до уровня 400 Дж. Сюда следует отнести переносной молот для забивки стержней в грунт, молот для динамического зондирования грунтов, сейсмоисточник для рудной разведки [60; 66; 74]. Более широкий диапазон разброса этого показателя у молотов с энергией удара более 1 кДж. Большая часть спроектированных молотов имеет энергию удара 1,8...30,0 кДж.

Уникальными в классе электромагнитных машин являются молоты простого действия МЭМ-100 и МЭМ-400 [50], разработанные в ИГД СО РАН и СКБ прикладной геофизики СО РАН, с энергией удара соответственно 100 и 400 кДж.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что электромагнитные ударные машины обладают широким диапазоном возможностей по критерию «энергия единичного удара» и могут применяться для решения задач широкого спектра технологических процессов.

Как известно, величина ударной мощности машины влияет на производительность технологического процесса и является одним из основных показателей любой машины ударного действия. Однако при этом надо учитывать, что энергоемкость процесса разрушения резко падает с увеличением энергии удара и, следовательно, влияние энергии удара на производительность машины значительно выше, чем влияние частоты ударов. Таким образом, при одной и той же ударной мощности машины можно повысить ее производительность за счет оптимизации структуры этой мощности путем увеличения энергии удара при одновременном снижении частоты ударов. Это обстоятельство широко исполь-

зуются разработчиками ручных ударных машин, для которых ударная мощность не превышает 250 Вт для однообмоточных машин и 375 Вт для машин с двумя обмотками. Примерно такую же ударную мощность 18...327 Вт развивают прессы ударного действия. Диапазон величины ударной мощности бетоноломов, составляющий 417...625 Вт, сопоставим ударной мощностью 500...800 Вт молотов с энергией ударов до 1 кДж. Более широкий диапазон изменения ударной мощности 2,25...40 кВт имеют молоты с энергией удара, превышающей 1 кДж, при максимальном значении показателя, равном 160 кВт (молот МЭМ-400). Для основной массы молотов диапазон значений ударной мощности составляет 3,0...25,0 кВт.

Таким образом, электромагнитные ударные машины обладают достаточно широким диапазоном изменения ударной мощности. Это свидетельствует о том, что электромагнитные ударные машины могут выполнять большой спектр технологических операций в различных условиях.

Если энергия ударов, частота ударов и ударная мощность являются критерием производительности, то КПД, удельные показатели энергии и мощности характеризуют энергоемкость и экономичность машины, степень использования материалов, рациональность принципа, по которому построена машина, конструктивное совершенство и фактическую величину удельной работы, которую может совершить машина в единицу времени цикла с заданной продолжительностью включения. Как видно из табл. 1.6, отражающей уровень КПД, характеризующего эффективность процесса энергопреобразования в электромагнитных ударных машинах, для основной массы машин значение этого показателя не превышает 0,46 и колеблется в диапазоне 0,09...0,45 при наиболее часто встречающихся значениях 0,25...0,38. По величине КПД электромагнитные ударные машины уступают аналогичным машинам с приводом вращательного действия. Повышение КПД для электромагнитных ударных машин имеет особенно важное значение, заключающееся не столько в экономии подводимой энергии, сколько в улучшении основных показателей, а именно в снижении массы, уменьшении нагрева, увеличении продолжительности включения.

У ручных ударных машин с электромагнитным приводом в последнее время наблюдается тенденция снижения КПД, что связано с уменьшением массы активных материалов, определяющих массу машины, являющейся одним из основных показателей ручных машин (рис. 1.10). Однако величина КПД находится на уровне, необходимом для обеспечения воздушной системой охлаждения заданной продолжительности включения.

В табл. 1.6 представлены также диапазоны ударной энергии и ударной мощности, приходящиеся на единицу массы машины, являющиеся показателями конструктивного совершенства ударного устройства и служащие главными комплексными показателями качественной оценки их технического уровня.

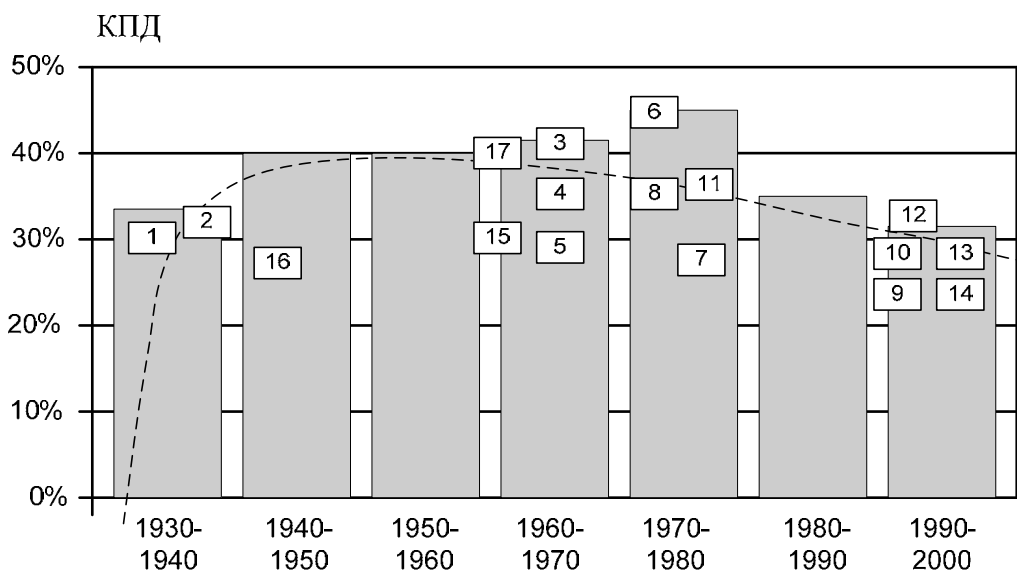


Рис. 1.10. КПД серийных ручных электромагнитных машин за 70 лет:

1 – Sintron; 2 – AEG; 3 – МС-15Д; 4 – МС-15/36; 5 – МС-18А; 6 – ИЭ-4210; 7 – ИЭ-4214; 8 – ИЭ-4207; 9 – ИЭ-4720; 10 – ИЭ-4219; 11 – ИЭ-4709; 12 – ИЭ-4724; 13 – ИЭ-4220; 14 – ТТ-312; 15 – Sintron 22S; 16 – проф. Москвитина; 17 – УЭ-2

При сравнении одноударных машин одинакового принципа действия более высокий технический уровень имеет, как правило, машина с большим показателем удельной энергии удара. При сравнении редко- и частоударных машин с одинаковой удельной ударной мощностью преимущество будет у машин с более высокой удельной энергией удара. На рис. 1.11 – 1.16 в виде критериальных зон показаны тенденции изменения этих показателей с ростом активной массы машин.

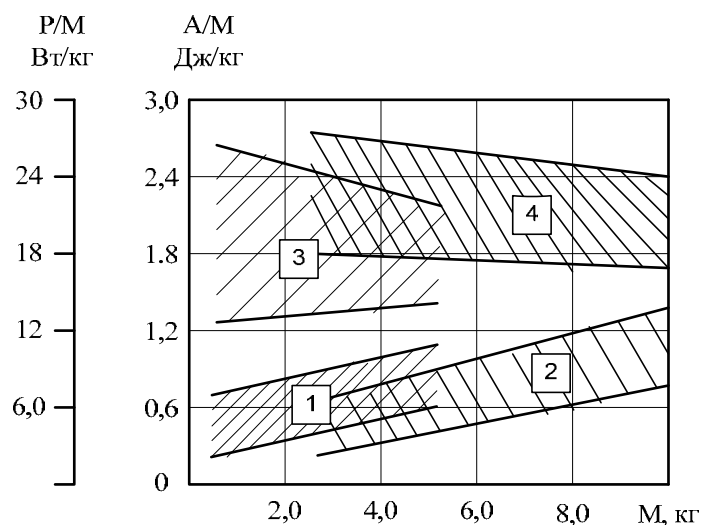


Рис. 1.11. Диапазоны изменения удельной энергии удара и удельной ударной мощности в зависимости от массы ручных однокатушечных машин: удельной энергии удара молотков – 1 и перфораторов – 2; удельной ударной мощности молотков – 3 и перфораторов – 4

Результаты сравнения ручных однообмоточных электромагнитных ударных и ударно-вращательных машин по удельной энергии удара показывают соизмеримость диапазонов изменения этого показателя в значительной части критериальных зон, составляющих 0,13...0,87 Дж/кг для молотков и 0,37...0,83 Дж/кг для перфораторов.

С ростом массы однообмоточных ручных машин наблюдается тенденция увеличения удельной энергии удара (рис. 1.11). С увеличением массы активных материалов удельные показатели двухобмоточных ручных машин возрастают (рис. 1.12). Несколько шире диапазон изменения 0,23...1,55 Дж/кг этого показателя у двухобмоточных ручных машин. Более высокое значение показателя у молотков объясняется тем, что в перфораторах при равных массах ударных узлов в общую долю веса машины входит масса редуктора и двигателя вращателя (табл. 1.6).

По удельной ударной мощности двухкатушечные молотки имеют более высокие показатели по сравнению с однокатушечными. Уровень удельной ударной мощности у двухкатушечных молотков выше, чем у однокатушечных, и составляет 5,9...49 Вт/кг, в то время как у однокатушечных этот показатель лежит в интервале 5,4...24,3 Вт/кг.

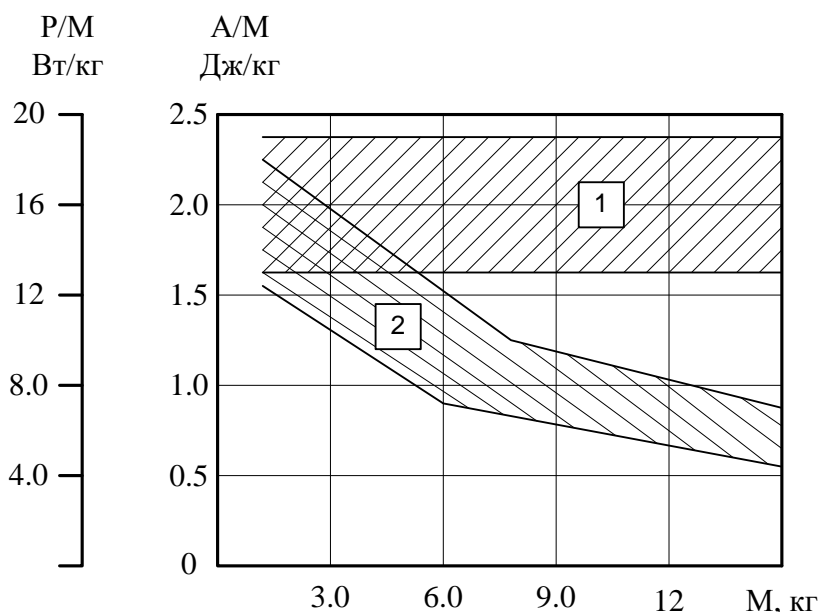


Рис. 1.12. Диапазоны изменения удельной энергии удара – 1 и удельной ударной мощности – 2 в зависимости от массы ручных двухкатушечных машин

Несмотря на относительно высокие значения удельной энергии удара 0,9...2,22 Дж/кг, бетоноломы по удельной ударной мощности отстают от молотков, обеспечивая 22...28 Вт/кг, что обусловлено пониженной частотой ударов бойка. Примером может служить бетонолом ИЭ-4214 с энергией удара 25 Дж и частотой ударов бойка $16,7 \text{ с}^{-1}$, которая в 3 раза ниже, чем у серийного молотка ИЭ-4207.

Более стабильное значение удельной энергии удара имеют ударные прессы. Примерно на том же уровне находится этот показатель у молотов с энергией удара 1 кДж, составляющий 1,25...3,9 Дж/кг.

Удельная энергия удара у большей части молотов с энергией удара более 1 кДж находится в диапазоне от 4,0 до 5,0 Дж/кг, что в 2,5 раза выше, чем у бетоноломов, и в 3,5 раза выше, чем у двухкатушечных молотков.

В то же время по удельной ударной мощности данные молоты значительно уступают другим типам машин. В отличие от прессов (рис. 1.13) с увеличением массы молотов их удельные энергетические показатели возрастают (рис. 1.14).

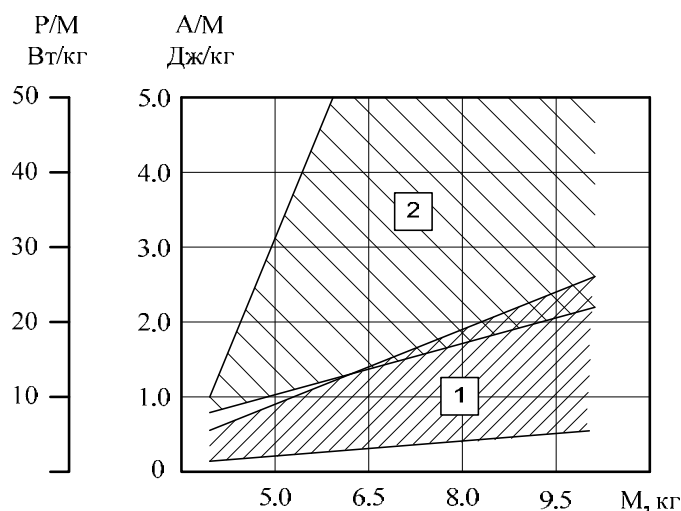


Рис. 1.13. Диапазоны изменения удельной энергии удара – 1 и удельной ударной мощности – 2 в зависимости от массы прессов

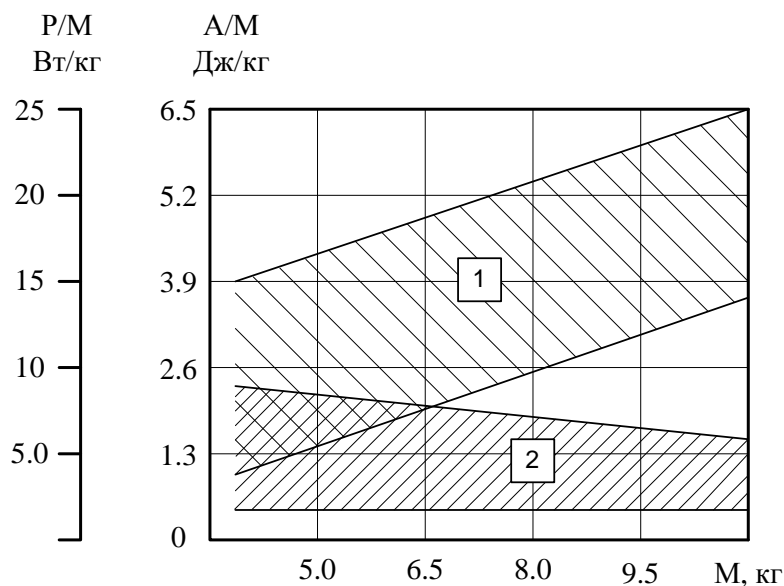


Рис. 1.14. Диапазоны изменения удельной энергии удара – 1 и удельной ударной мощности – 2 в зависимости от массы молотов

Анализ электромагнитных ударных машин различных типов и конструкций показывает, что поскольку энергия удара и ударная мощность, приходящиеся на единицу массы, соответственно отражают энергонасыщенность и энергонагруженность машин, наиболее энергетически насыщенными являются мощные молоты, а наиболее энергетически нагруженными – двухобмоточные молотки. Это следует учитывать на стадии проектирования и изготовления машин различных классов при выборе материалов и технологии обработки деталей и узлов.

Существенными параметрами, определяющими экономичность электромагнитных машин, являются отношения ударной энергии и ударной мощности к массе меди обмотки двигателя.

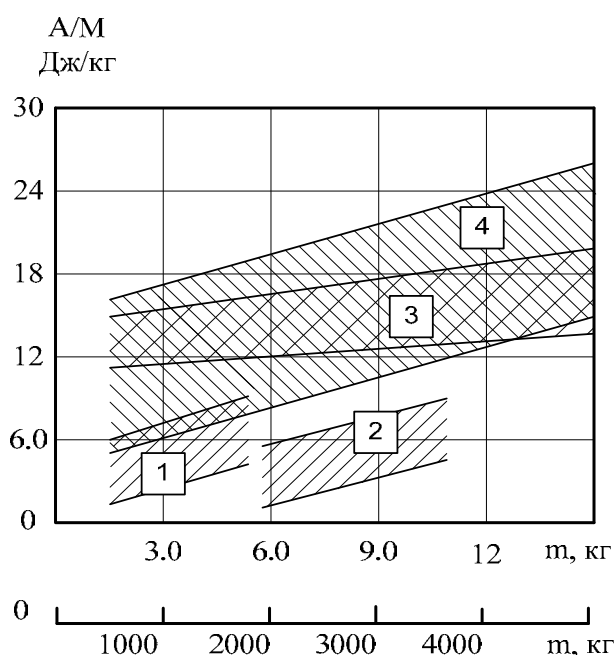


Рис. 1.15. Диапазоны изменения энергии удара, отнесенной к массе меди обмотки двигателя, в зависимости от массы машины: однокатушечных ручных машин – 1 и двухкатушечных ручных машин – 2, прессов – 3, молотов (масса до 5000 кг) – 4

Проведенный анализ машин по этим показателям, представленный в табл. 1.6 и на графиках рис. 1.15 и 1.16 в виде критериальных зон, позволяет утверждать, что наиболее низкими значениями отношения ударной энергии к массе меди обмотки двигателя имеют молотки и перфораторы, у которых максимальный уровень показателя не превышает 7,4 Дж/кг при наиболее часто встречающихся значениях 2,7...4,0 Дж/кг.

Более высокие значения этого показателя у прессов и молотов с энергией удара выше 1 кДж. Показатель ударной мощности, приходящейся на единицу массы меди обмотки, у молотов с энергией удара более 1 кДж имеет самые низкие 11,1...21,5 Вт/кг значения, а наиболее высокое значение, достигающее 277 Вт/кг, у молотков и перфораторов.

За более чем вековую историю развития электромагнитных ударных машин на несколько порядков увеличились абсолютные значения энергии удара и ударная мощность, в несколько раз выросли удельные энергетические показатели и КПД.

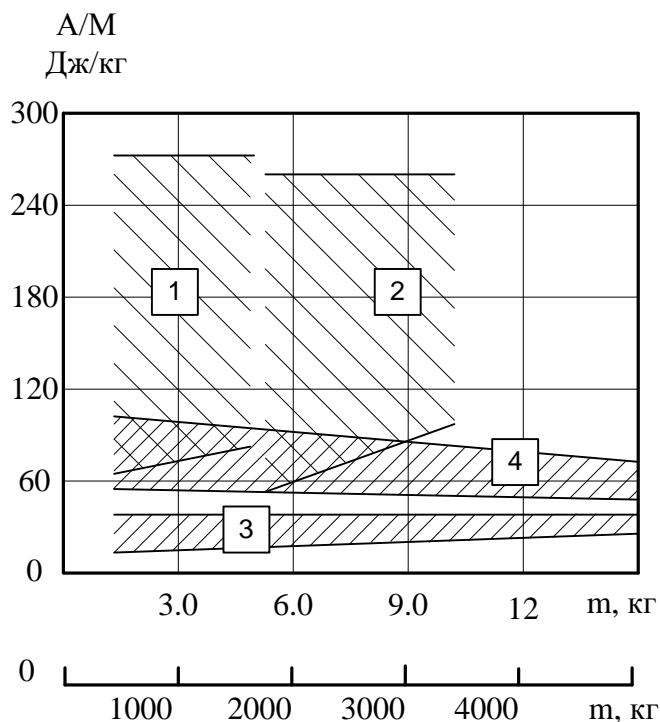


Рис. 1.16. Диапазоны изменения ударной мощности, отнесенной к массе меди обмотки двигателя, в зависимости от массы машины: однокатушечных ручных машин – 1 и двухкатушечных ручных машин – 2, прессов – 3, молотов (масса до 5000 кг) – 4

Это позволяет сделать вывод о том, что электромагнитные ударные машины обладают достаточно широким диапазоном возможностей, которые позволяют использовать их в разнообразных условиях.

Широкий диапазон колебаний удельных энергетических показателей даже у машин одной и той же группы объясняется различием конструктивных схем. У ручных электромагнитных машин это различие отражается в числе катушек, типе буферного устройства, реализуемой структуре ударной мощности и т.д., у молотов – в использовании катушек, типе магнитных систем, способе реализации механической мощности и т.д.

Дальнейшее развитие электромагнитных ударных машин и расширение области их применения связано с повышением их удельных силовых и энергетических показателей и надежности.

2. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД С ПОВЫШЕННЫМИ УДЕЛЬНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ И СИЛОВЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

2.1. ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЛЭМД

Рассмотрение процессов энергопреобразования, исследование характеристик электромагнитных двигателей различных типов и результаты создания электромагнитных молотков, перфораторов, молотов, прессов позволили выявить значительное влияние на удельные силовые и энергетические показатели импульсных ЛЭМД типа магнитной системы. В связи с этим актуальными являются исследования по оценке влияния известных типов магнитных систем ЛЭМД на эффективность электромеханического преобразования энергии, созданию новых эффективных магнитных систем.

Теоретической базой для разработки таких магнитных систем ЛЭМД является фундаментальный принцип неоднородности магнитного поля, участвующего в преобразовании электрической энергии в механическую [52; 295; 296]. Согласно ему появление движущих сил в любых исполнительных устройствах оказывается результатом возникновения градиента потенциала в пространстве, то есть неоднородности потенциальной энергии, соответствующей полю природы. При задании силового поля импульсного ЛЭМД с помощью напряженности магнитного поля или силы как некоторой скалярной функции U точки пространства

$$F_{\text{э}} = -\text{grad}U, \quad (2.1)$$

работа на конечном перемещении

$$A = \int_{X_1}^{X_2} dU = U(X_2) - U(X_1). \quad (2.2)$$

Выражения (2.1) и (2.2) показывают, что электромагнитная сила тяги тем сильнее, чем выше градиент потенциальной энергии магнитного поля, а работа тем больше, чем значительнее разность функции на пути перемещения, то есть чем значительнее неоднородность магнитного поля. Таким образом, неоднородность магнитного поля, участвующего в преобразовании электрической энергии в механическую в ЛЭМД, является фундаментальным принципом, определяющим их функционирование, а степень неоднородности магнитного поля определяет уровень удельных силовых и энергетических показателей.

Различные способы реализации этого принципа и экспериментальные исследования позволили разработать на уровне мировой новизны ряд магнитных систем ЛЭМД с удельными силовыми и энергетическими показателями, превосходящие известные магнитные системы аналогичного назначения.

При разработке новых и исследовании известных, но малоизученных магнитных систем нами впервые был применен следующий подход. Вначале разрабатывались теоретические предпосылки применения магнитной системы и оценивались ее потенциальные возможности для данной области использования. Далее проводились экспериментальные исследования с физическими моделями магнитных систем ЛЭМД, различающимися конструктивными исполнениями отдельных элементов магнитной цепи. Для получения легко сопоставимых данных магнитные системы имели одинаковую массу, а их статические тяговые характеристики снимались при одной и той же магнитодвижущей силе. На основе этих исследований и разработанной системы критериев проводилось предварительное сравнение магнитных систем. Такая оценка магнитных систем по статическим характеристикам является менее трудоемкой, чем оценка по динамическим характеристикам, но по ней можно сделать вывод о целесообразности дальнейшего анализа тех или иных типов магнитных систем.

Для применения в ЛЭМД различного назначения были разработаны и исследованы перспективные типы магнитных систем: броневые цилиндрические длинноходовые, броневые цилиндрические с двумя рабочими зазорами и комбинированным якорем, броневые цилиндрические поперечного поля с кольцевым якорем, броневые цилиндрические с многократным использованием магнитного потока. На основе таких ЛЭМД были исследованы, созданы и внедрены электромагнитные молоты, прессы, насосы высокого давления и другое оборудование. Результаты работ по этим направлениям отражены достаточно полно в монографиях [10, 12]. В настоящей работе приведены результаты исследований по магнитным системам ЛЭМД, которые не нашли отражения в монографических публикациях.

2.2. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ЛЭМД С УКРОЧЕННЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

С целью повышения удельных силовых показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами было использовано укорочение их магнитных систем, приводящее к возрастанию неоднородности магнитного поля в рабочих зазорах. При неизменном объеме V активных материалов это позволяет увеличить размеры двигателя в радиальном направлении и повысить удельное тяговое усилие F_k в конце рабочего хода $\bar{F}_k = F_k / V$. Покажем, как изменится тяговое усилие в конце рабочего хода ЛЭМД с двумя рабочими зазорами и комбинированным якорем в случае укорочения его магнитной системы по сравнению с базисной магнитной системой.

Пренебрегая потоками рассеяния и используя формулу Максвелла, определим тяговое усилие в конце рабочего хода

$$F_k = B_k^2 \cdot \pi \cdot r_1^2 / \mu_0, \quad (2.3)$$

где B_k - магнитная индукция в рабочем зазоре; r_1 - радиус втяжной части комбинированного якоря; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Приняв у сравниваемых ЛЭМД одинаковой величину B_k , запишем для базисного ЛЭМД с конструктивными параметрами $r_1=r_{1Б}$, $y=y_{Б}=3$ значения тягового усилия $F_{кБ}$ в конце рабочего хода

$$F_{кБ} = B_k^2 \cdot \pi \cdot r_{1Б}^2 / \mu_0, \quad (2.4)$$

где $y=l_0/r_1$ - относительная длина обмотки; l_0 - длина обмотки. Разделив (2.3) на (2.4), получим зависимость относительного тягового усилия \bar{F}_k в конце рабочего хода импульсного ЛЭМД от относительного радиуса $\bar{r}_1 = r_1 / r_{1Б}$ его якоря

$$\bar{F}_k = \bar{r}_1^2. \quad (2.5)$$

Объем активных материалов сравниваемых двигателей остается неизменным и определяется выражением [97]:

$$V = \pi \cdot r_1^3 \cdot (X^2 + 1) \cdot (y + 2 \cdot \bar{l}), \quad (2.6)$$

где $X = r_2 / r_1$; $\bar{l} = l / r_1$; r_2, l - внешний радиус обмотки и размер фланца ЛЭМД. Из (2.6) для укороченной магнитной системы с длиной $y=y_k$ и для базисной системы с длиной $y=y_{Б}=3$ выразим радиусы якоря $r_{1к}$ и $r_{1Б}$:

$$r_{1к} = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi \cdot (X^2 + 1) \cdot (y_k + 1)}}, \quad r_{1Б} = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi \cdot (X^2 + 1) \cdot (y_{Б} + 1)}}. \quad (2.7)$$

С учетом (2.5) относительный радиус якоря $\bar{r}_{1к} = r_{1к} / r_{1Б}$ в случае укорочения магнитной системы ЛЭМД и для параметров $X = 1,5$ и $y_{Б} = 3$ равен

$$\bar{r}_{1к} = \sqrt[3]{\frac{4}{y_k + 1}}. \quad (2.8)$$

Используя это соотношение, определим по выражению (2.3) усилие F_k импульсного ЛЭМД в случае укорочения его магнитной системы и при условии постоянства объема $V=const$

$$\bar{F}_k = \sqrt[3]{\frac{16}{(y_k + 1)^2}}. \quad (2.9)$$

На рис. 2.1 представлена зависимость $\bar{F}_k(y_k)$, построенная по выражению (2.9). Анализ ее показывает, что усилие F_k в конце рабочего хода ЛЭМД в случае укорочения его магнитной системы возрастает и ограничено величиной,

равной $\bar{F}_k = 2,52$, когда длина обмотки стремится к нулю, вследствие чего плотность тока в ней возрастает до бесконечности.

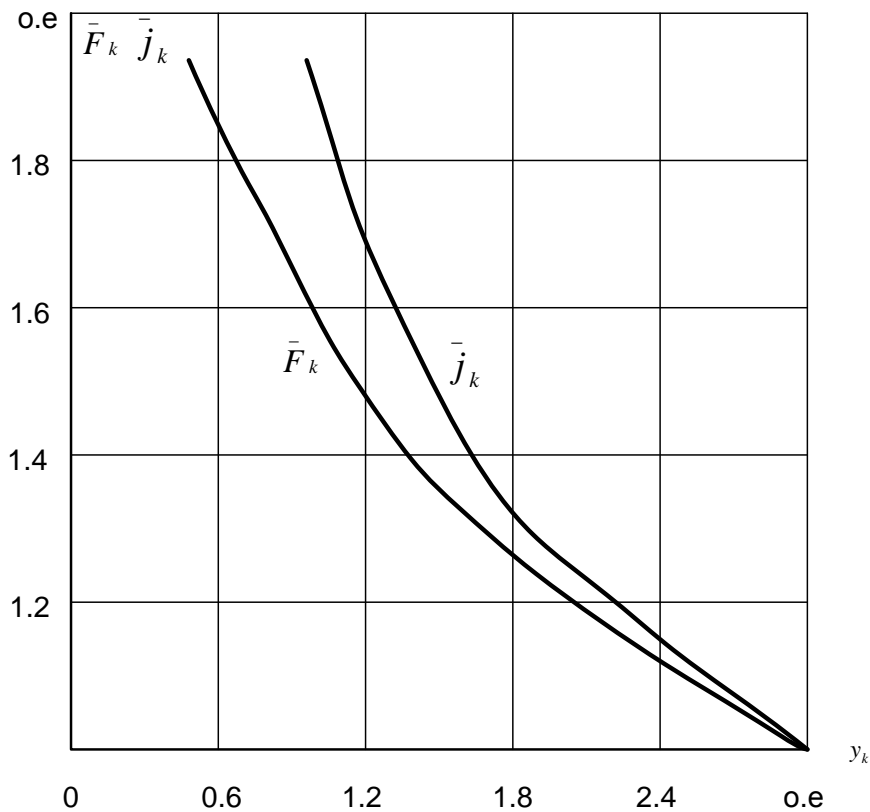


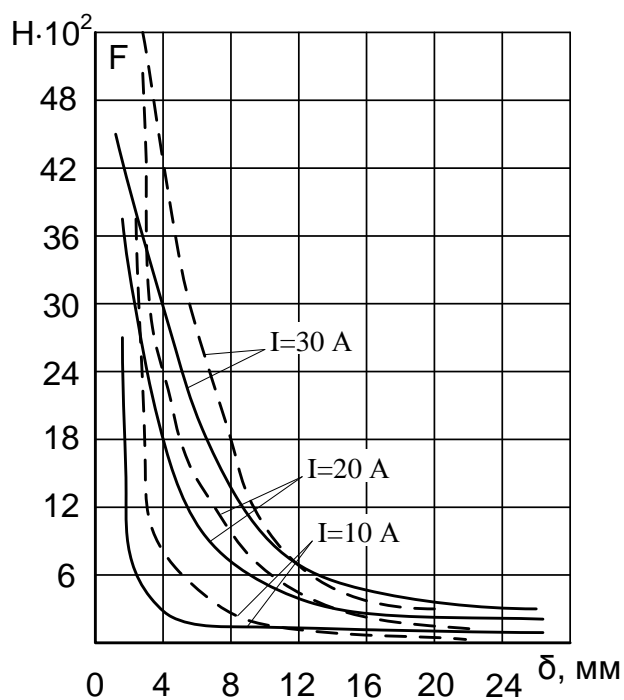
Рис. 2.1. Зависимости относительных значений конечного тягового усилия \bar{F}_k и плотности тока в обмотке \bar{j}_k от длины магнитной системы y_k при ее укорочении

С целью экспериментальной проверки эффективности укорочения магнитных систем ЛЭМД нами были спроектированы, изготовлены и исследованы четыре физические модели ЛЭМД с двумя рабочими зазорами и комбинированными якорями, у которых относительные длины обмоток при изменении длины магнитной системы отличались в два раза. Все двигатели имели одинаковые объемы активных материалов и геометрические соотношения $x=r_2/r_1$, где r_2 - внешний радиус обмотки; r_1 - радиус втяжной части якоря. Магнитопроводы всех двигателей изготовлены из стали одной марки, обмотки имели одинаковое число витков. Два двигателя (базисные) с номинальными усилиями 3 кН и 8 кН имели относительную длину обмотки $y = 3$, другие два (короткие) имели $y = 1,5$.

На рис. 2.2 приведены статические тяговые характеристики исследуемых ЛЭМД (базисного с усилием 3 кН и «короткого»). Так как исследуемые двигатели имеют различную длину обмотки, которая определяет и различный рабо-

чий ход якоря, то для корректности проведем их сравнение при одинаковом относительном рабочем ходе $\bar{\delta} = \delta/l_0 = 0,43$ и одинаковом абсолютном рабочем ходе, равном 0,018 м.

Сравнение экспериментальных тяговых характеристик показывает, что в первом случае ЛЭМД с укороченной магнитной системой и длиной обмотки $y = 1,5$ превосходит базисный ЛЭМД по начальному тяговому усилию на 16 %, по конечному – на 53 %. Превышение по начальному тяговому усилию более выражено для меньших значений δ , что объясняется снижением тягового усилия у базисного ЛЭМД вследствие значительного по условиям эксперимента рабочего зазора δ , равного 0,035 м (у «короткого» $\delta = 0,018$ м). Превышение конечного тягового усилия F_k вызвано более ранним насыщением магнитной системы базисного ЛЭМД. По величине интегральной работы исследуемые двигатели отличаются незначительно.



— базисный ЛЭМД-0.3 ($y=3$; $V_g=5.45 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$)
 - - - - ЛЭМД-0.3К ($y=1.5$; $V_g=5.6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$)

Рис. 2.2. Статические тяговые характеристики ЛЭМД-0.3 и ЛЭМД-0.3К с одинаковым объемом активных материалов

Во втором случае ЛЭМД с укороченной магнитной системой превосходит базисный двигатель по величине интегральной работы на 23%, а по конечному тяговому усилию – на 53%, но уступает по начальному тяговому усилию на 42%. Превышение интегральной работы объясняется тем, что она при малых ходах якоря зависит, в основном, от приращения тягового усилия в конце рабо-

чего хода, которое, как было показано ранее, значительно больше для «короткого», нежели для базисного ЛЭМД. Базисный двигатель «недобирает» интегральную работу из-за уменьшения хода. Снижение начального тягового усилия F_n у ЛЭМД с укороченной магнитной системой в этом случае объясняется тем, что вклад потоков рассеяния в создание тягового усилия у таких ЛЭМД меньше.

Аналогичные тенденции прослеживаются и для других исследованных ЛЭМД. Проведенные исследования позволили сделать вывод, что ЛЭМД одинакового объема с укороченной магнитной системой и относительной длиной обмотки $y = 1,5$ эффективнее базисных ЛЭМД с $y = 3$ по удельным силовым показателям на относительно коротких ходах якоря, когда $\delta < 0,4 \cdot l_0$. У рассмотренных ЛЭМД с укороченной магнитной системой удельное тяговое усилие возросло с 0,8...0,9 до 1,2...1,4 кН/кг. Применение импульсных ЛЭМД с укороченной магнитной системой позволит при заданных значениях тягового усилия в конце рабочего хода снизить массу и добиться экономии активных материалов до 50%.

2.3. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЛЭМД С КОМБИНИРОВАННЫМ ЯКОРЕМ, ДВУМЯ РАБОЧИМИ ЗАЗОРАМИ И ФЕРРОМАГНИТНЫМ НАПРАВЛЯЮЩИМ КОРПУСОМ

Другим путем повышения эффективности импульсных ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами является применение ферромагнитных направляющих корпусов [10]. Это позволяет расширить функциональные возможности этих двигателей, придав им универсальность за счет возможности использования как при малых, так и при средних и больших перемещениях.

При значительном ходе якоря дисковая часть якоря и ферромагнитная стенка направляющего корпуса образуют «воротничок» и при правильном выборе паразитного зазора в нем в двигателях такой конструкции будет возрастать начальное тяговое усилие по сравнению с ЛЭМД с неферромагнитными направляющими корпусами.

Замена неферромагнитных направляющих корпусов ЛЭМД, выполняемых обычно из цветных металлов (бронза, дюралюминий), на стальные, изготавливаемые заодно со статорами ведет также к значительному снижению стоимости изготовления двигателей.

Был разработан ряд новых конструкций магнитных систем ЛЭМД, обладающих указанными преимуществами. Одна из таких конструкций ЛЭМД приведена на рис. 2.3. В расточке статора 1, выполненного заодно с направляющим корпусом, помещена цилиндрическая обмотка 2, которая удерживается от

перемещения фланцем 3. Для плотной опрессовки обмотки между ее торцом и статором установлены шайбы 4 из текстолита и электрокартона.

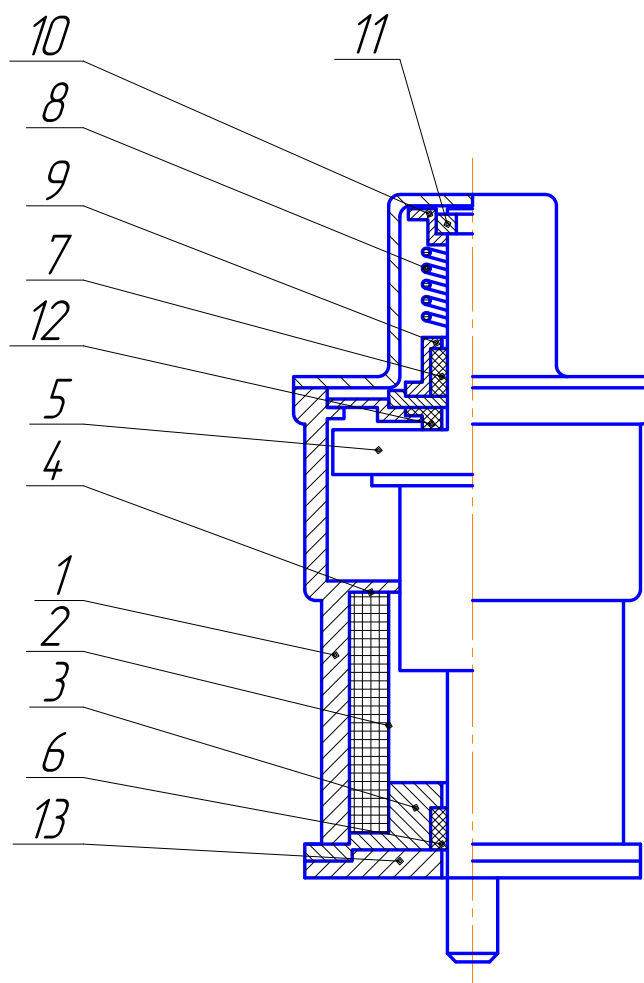


Рис. 2.3. Конструкция ЛЭМД с двумя рабочими зазорами, комбинированным якорем и ферромагнитным направляющим корпусом

Внутри обмотки помещен якорь 5, имеющий возможность аксиального перемещения во фторопластовых направляющих втулках 6 и 7. Возвратная пружина 8, размещенная в верхней части ЛЭМД, поджата между гильзами 9 и 10 с помощью вкладышей 11. Для ограничения крайнего верхнего положения и смягчения удара при возврате якоря служит резиновый буфер 12. С помощью фланца 13 двигатель крепится к верхней плите станины.

Анализ тяговых характеристик таких ЛЭМД, выполненных по конструктивной схеме (рис. 2.3), с направляющими корпусами из неферромагнитных материалов при одинаковой массе активных материалов и МДС показывает, что при больших зазорах начальное тяговое усилие двигателей со сплошным ферромагнитным статором в 5...6 раз выше, чем у ЛЭМД с неферромагнитным направляющим корпусом. Указанное свойство сильно влияет на их динамические показатели.

2.4. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД С ЗУБЦОВЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Следующий путь повышения эффективности ЛЭМД связан с измельчением структуры его магнитной цепи за счет выполнения на полюсах и якоре зубцовых зон, благодаря чему при заходе якоря под полюс скорость изменения производной индуктивности (магнитной проводимости) по перемещению якоря будет значительно выше, чем при неизмельченной (гладкой) структуре этих же элементов. Увеличится при этом и электромагнитная сила тяги, действующая на якорь, так как она пропорциональна производной индуктивности (магнитной проводимости) по перемещению якоря [8]. Для электромагнитных молотов выполнение на обращенной к якору поверхности полюсов и на якоре зубцовых зон позволит осуществить бесконтактное удержание якоря в крайнем положении обратного хода за его боковую поверхность и интенсивное аккумулялирование магнитной энергии. В результате увеличится удельная энергия удара вследствие снижения массы молота, так как удержание осуществляется электромагнитными силами самих силовых катушек либо их секциями без дополнительных устройств, а также повышается надежность электромагнитного молота.

Кроме того, после трогания якоря удерживающее усилие от зон с выступами резко снижается, изменяя свое направление на противоположное, и на некотором интервале движения оно может быть использовано для дополнительного ускорения якоря. Применение зубцовых магнитных систем в конструкциях импульсных сейсмоисточников, установках ударного уплотнения бетонной смеси сравнительно просто решает задачу создания прижима рабочего органа машины к обрабатываемой среде, исключает отскок и повторные удары. Это расширяет функциональную емкость импульсных ЛЭМД [293]. В магнитных системах таких двигателей с многократным использованием магнитного потока выполнение на внутренней поверхности ферромагнитных колец втулки и на наружной поверхности ферромагнитных колец якоря поперечных кольцевых зубцов позволяет увеличить максимальное тяговое усилие [119].

Для оценки величин электромагнитных сил, которые могут быть реально обеспечены в электромагнитных молотах зубцами полюсов и якоря, был проведен расчет для молота с энергией удара $A = 2$ кДж, диаметром бойка $d_8 = 0,17$ м, длиной полюсов $l_n = 0,03$ м, числом полюсов $n_n = 3$, толщиной направляющей втулки $\Delta = 0,004$ м. Максимальное статическое тяговое усилие $F_T = 4300$ Н, динамическое усилие обмотки рабочего хода $F_d = 2150$ Н [12].

Результаты расчетов по методике [299] показали, что максимальное статическое усилие, создаваемое зубцовыми зонами трех полюсов, составляет 8048 Н, а максимальное ускоряющее усилие, действующее на якорь двигателя при рабочем ходе, равно 5800 Н. Таким образом, зубцовые зоны якоря и полюсов могут обеспечить такое усилие удержания якоря в крайнем положении в обмотке холостого хода, которое значительно превысит статическое тяговое

усилие, действующее на якорь при рабочем ходе. Благодаря этому в электромагнитном молоте можно обеспечить режим работы, когда начальное усилие трогания якоря будет близко к максимальному статическому усилию и будет возрастать по мере уменьшения рабочего воздушного зазора. Следовательно, на всем интервале движения якоря ускоряющее усилие, действующее на якорь в режиме с удержанием, будет в 1,5 раза больше ускоряющего усилия в режиме без удержания.

С целью практической оценки возможности и целесообразности использования зубчатых магнитных систем в конструкции магнитных систем двигателей ударных машин нами проведены исследования физических моделей, изображенных на рис. 2.4 [120].

Все модели были выполнены из одной марки стали и имели одинаковую массу. Каждая из моделей содержит обмотку 1 с наружным магнитопроводом 2 и полюсами 3, 4, внутри которых расположен якорь 5, имеющий возможность аксиального перемещения внутри немагнитной направляющей втулки 6. На внутренней поверхности полюса расположены поперечные зубцы, а на боковой поверхности якоря - ответные зубцы. Для каждой системы были экспериментально получены семейства статических тяговых характеристик (рис. 2.6).

Оценим эффективность предлагаемого способа повышения удельных показателей импульсных ЛЭМД с помощью обобщенной статической тяговой характеристики (рис. 2.5) и предлагаемых критериев: максимальное удельное удерживающее f_m , скорость убывания удерживающего усилия V :

$$f_m = F_m/m; \quad V = \Delta F/\Delta X,$$

где F_m - максимальное удерживающее усилие для данного тока; m - масса магнитной системы; ΔF - изменение силы по статической тяговой характеристике; ΔX - длина хода якоря, на котором происходит изменение силы.

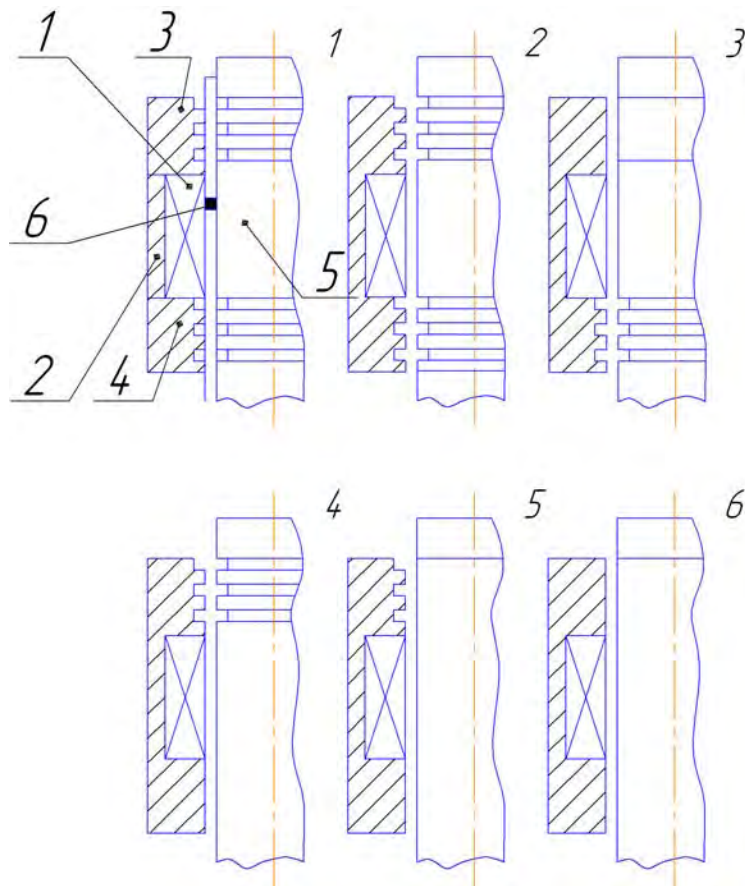


Рис. 2.4. Конструкции магнитных систем ЛЭМД с зубцовым магнитопроводом

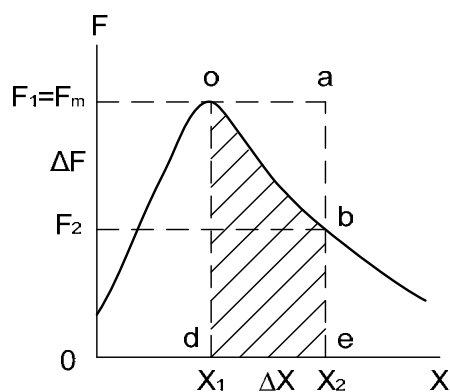


Рис. 2.5. Обобщенная статическая тяговая характеристика ЛЭМД

При недостаточно быстром убывании удерживающего тягового усилия часть электромагнитной силы рабочей обмотки ЛЭМД используется на его преодоление, что снижает эффективность двигателя. Быстрое убывание удерживающего усилия после трогания якоря можно обеспечить соответствующей формой статической тяговой характеристики удерживающего устройства либо

его отключением. При этом необходимо учитывать, что обмотки мощных ЛЭМД имеют значительные величины индуктивностей и при отключении тока некоторое время сохраняют большие значения.

В качестве энергетического критерия принята минимальная относительная работа A_* , равная отношению реальной работы A_p по преодолению удерживающего усилия на интервале хода якоря к работе A_n максимальной удерживающей силы на этом же участке хода. Работа A_p пропорциональна площади криволинейной трапеции S_{obed} , находящейся под участком «o-b» статической тяговой характеристики удерживающего устройства, а работа A_n – площади S_{oded} (рис. 2.5):

$$A_* = S_{obed} / S_{oded} = \int_{X_1}^{X_2} F_y(X) dX / F_m \Delta X.$$

Если система используется для удержания якоря в начале рабочего хода, то якорь 5 (рис. 2.4) под действием, например, силы тяжести, стремится вниз, а магнитное поле обмотки создает удерживающее усилие, направленное вверх.

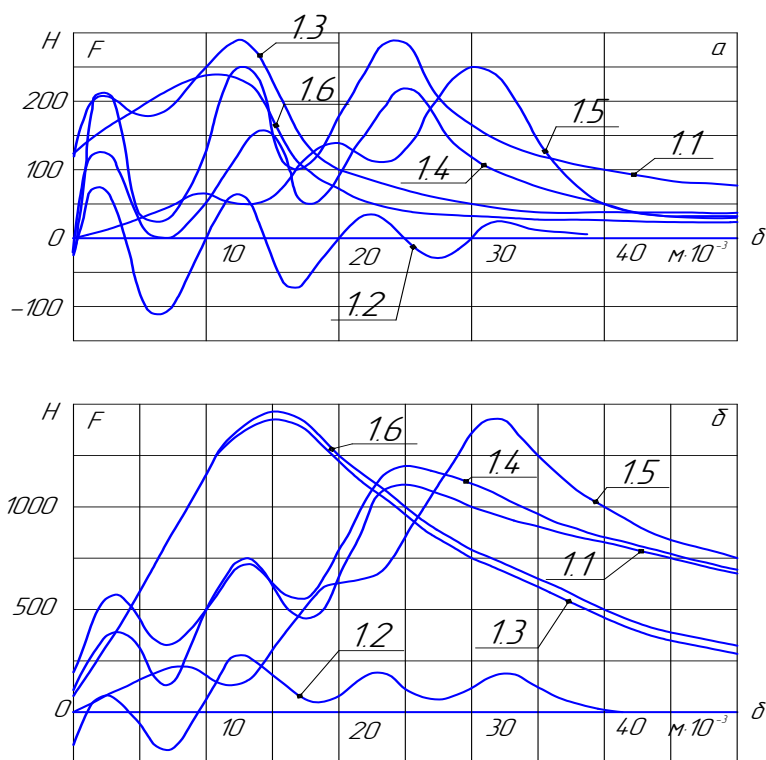


Рис. 2.6. Статические тяговые характеристики магнитных систем ЛЭМД с зубцовым магнитопроводом: а – ток $I=5$ А; б – ток $I=20$ А

По тяговой характеристике для значения тока $I=5$ А, соответствующего току удержания, были найдены значения предложенных критериев. При этом интегральная работа находилась как площадь, ограниченная осями координат и соответствующей кривой статического тягового усилия. Значения этих крите-

риев приведены на диаграммах (рис. 2.7 а, б, в, г). Сплошные линии соответствуют значению критериев, когда якорь удерживается в пределах верхнего полюса катушки. Пунктирные линии – для режима работы с выбегом якоря за пределы верхнего полюса в конце холостого хода.

Из диаграмм видно, что в режиме работы без выбега якоря наибольшую скорость убывания электромагнитной удерживающей силы по ходу якоря обеспечивают системы 1 и 2 (рис. 2.4).

Системы 1 и 2 имеют наибольшую величину тягового усилия, так как тяговое усилие в них создается за счет двух рабочих зазоров. В системе 1 тяговое усилие от зубцовых зон обоих полюсов накладывается на тяговое усилие между верхним торцом якоря и верхним полюсом, а в системе 3 тяговое усилие между торцом якоря и верхним полюсом складывается с усилием от взаимодействия зубцов нижнего полюса катушки с зубцами якоря.

Система 2 с зубцами на обоих полюсах обеспечивает минимальное значение критерия А. Это связано с тем, что электромагнитная сила тяги от зубцов по ходу якоря изменяет своё направление (рис. 2.6, кривая 1.2). Поэтому часть энергии, затраченная на преодоление удерживающего усилия на одном интервале хода, может восполняться на следующем участке движения якоря за счет ускоряющего действия зубцов.

Недостатком данной системы является малая величина максимального усилия. Однако в данном случае геометрия зубцовых зон не была оптимальной. Это, в известной мере, связано с тем, что в ЛЭМД ударного действия величина паразитного зазора между якорем и полюсом определяется толщиной немагнитной направляющей втулки, которая выбирается из условий механической прочности и условий эффективности рабочего процесса двигателя [298].

Как показывают расчеты, выполненных с использованием рекомендаций [299], величина статического тягового усилия может быть увеличена вдвое за счет выбора соответствующих параметров направляющей втулки, зубца.

В режиме работы двигателя с выбегом якоря за пределы полюса наибольшие значения предложенных критериев имеют системы 1 и 2 с зубцами на обоих полюсах, а системы 5 и 6 с гладким якорем не создают удерживающего усилия.

Если системы 1- 6 используются для прижима якоря к инструменту в момент удара, то в положении, показанном на рис. 2.4, катушка является рабочей, а направление рабочего хода – вверх. В этом случае нужно оценить работу, которую может произвести каждая из этих систем за время рабочего хода. Для этого по статическим характеристикам (рис. 2.6) систем 1 – 6 найдена интегральная работа, относительные значения которой приведены на рис. 2.7 (сплошные линии соответствуют режиму без выбега якоря в сторону рабочего хода, а пунктирные - с выбегом якоря).

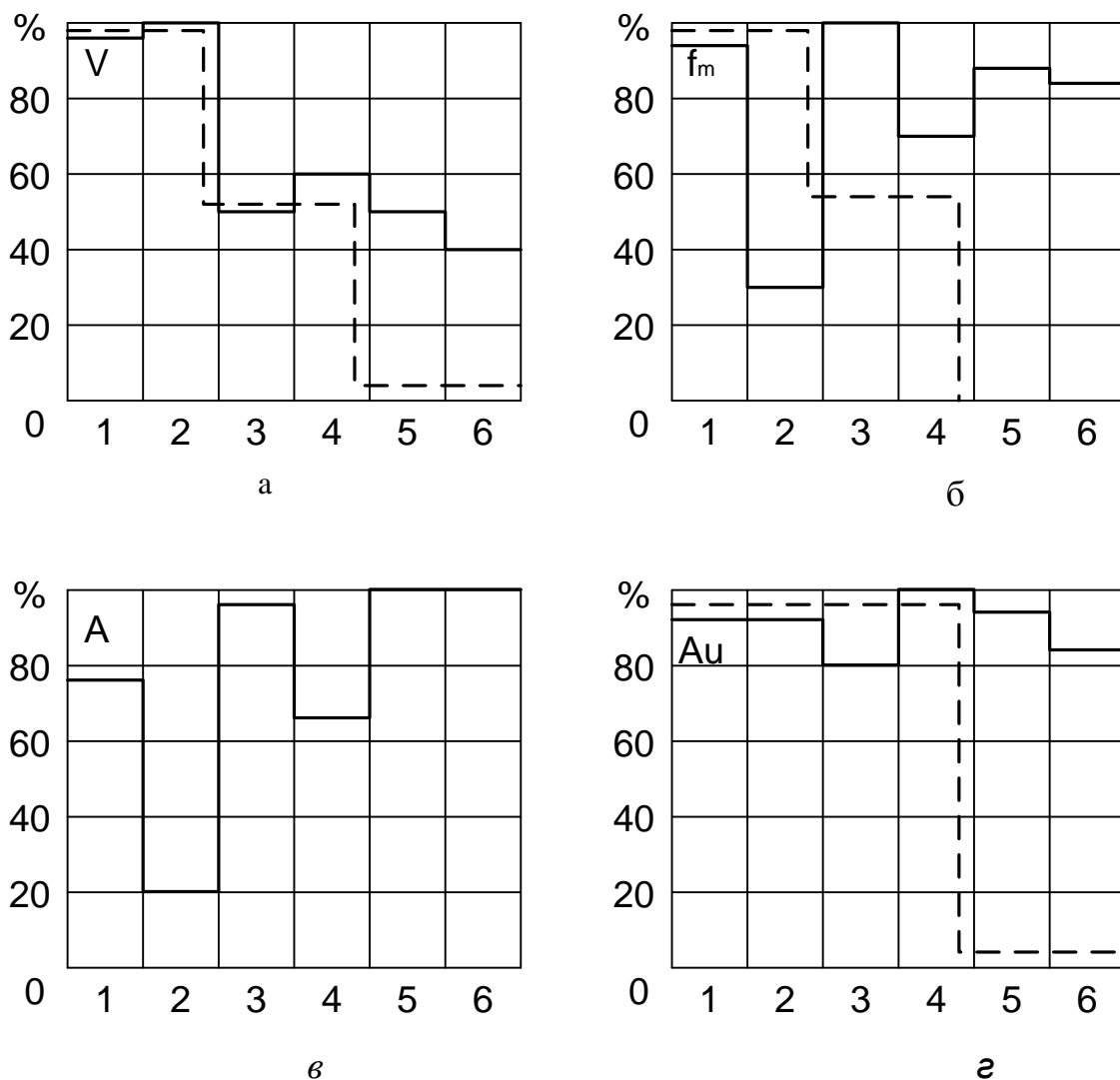


Рис. 2.7. Значения критериев оценки эффективности зубцовых магнитных систем ЛЭМД: а – скорость убывания удерживающего усилия; б – удельное удерживающее усилие; в – относительная работа; г – интегральная работа магнитных систем за рабочий ход

Из диаграммы следует, что наибольшую работу при рабочем ходе с последующим удержанием якоря в пределах верхнего полюса могут совершить системы 1, 2, 4, 5. Частично приращение энергии в этих системах по сравнению с системами 3 и 6 обусловлено большей величиной хода якоря, так как длина верхних зубчатых полюсов больше, чем длина гладких полюсов в системах 3 и 6.

Если ЛЭМД работает со свободным выбегом якоря, то работу систем 1-4 можно значительно повысить, в то время как свободный выбег якоря в системах 5 и 6 с гладким якорем исключает прижим якоря к инструменту в конце хода.

Обычно линейный электромагнитный двигатель имеет двухкатушечную конструктивную схему. Его рабочая (нижняя) катушка и катушка холостого хода (верхняя) могут быть выполнены соответственно по схемам рис. 2.4-4, и

рис. 2.4-6. Сравнение показало, что максимальные усилия систем 1 – 6 (рис. 2.4) при значении удерживающего тока $I=5$ А (рис. 2.24 а) составляют соответственно 93, 30, 97, 70, 83, 80 процентов от начального тягового усилия системы 6 (рис. 2.4), для значения рабочего тока $I=20$ А (кривая 1,6, рис. 2.6 б). Таким образом, любая из этих систем может обеспечить удержание якоря в начале рабочего хода до момента трогания.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы: доказана возможность и целесообразность удержания якоря линейного электромагнитного двигателя за счет зубчатости полюсов статора и якоря; рассмотренные системы могут выполнять функции удержания якоря в начале рабочего хода для эффективного накопления магнитной энергии, а также в конце - для предотвращения отскока якоря от инструмента (среды) в момент удара; для удержания якоря в начале хода наиболее эффективными являются системы 1, 2, 3, 4, а для режима со свободным выбегом якоря – системы 1 и 2 (рис. 2.4); для удержания якоря в конце рабочего хода эффективны системы 1, 2, 4, 5, имеющие большую величину интегральной работы.

Полученные результаты позволили проанализировать конструктивные схемы двухобмоточных импульсных ЛЭМД с зубцовыми элементами магнитопровода. В качестве критерия эффективности конструктивной схемы использовалась интегральная работа, определяемая для каждой конструкции по тяговой характеристике, соответствующей реальному току трогания. Установлено, что наиболее эффективной конструкцией ЛЭМД, реализующей удержание якоря в начале хода, является конструкция, использующая для рабочего и холостого ходов соответственно магнитные системы 6 и 2; наиболее эффективной конструкцией ЛЭМД, обеспечивавшей удержание якоря в конце хода, является конструкция, использующая для рабочего и холостого ходов магнитные системы 2 и 6. В соответствии с этими выводами нами предложены оригинальные конструкции молотов с зубцовыми элементами магнитопроводов [293].

2.5. СРАВНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД

Сравнение магнитных систем импульсных ЛЭМД имеет целью определить рациональную область их применения на основании принятых критериев. Так как к основным показателям импульсных ЛЭМД относятся совершаемая механическая работа, максимальное усилие и величина рабочего хода, то в качестве критериев для сравнения магнитных систем электромагнитных двигателей для импульсных технологий могут выступать как они, так и удельные показатели работоспособности $a_{н\gamma} = A_n / m_\gamma$ и усилия $f_{\gamma\mu} = A_n / m_\gamma$, где $A_n = \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta$ - интегральная работа, зависящая от силы тяги F_γ и хода δ ; $F_{\gamma\mu}$ - максимальное тяговое усилие ЛЭМД.

Величина интегральной работы характеризует потенциальные энергетические возможности электромагнитного двигателя в совершении им механической работы, которая может быть определена по формуле: $A_m = k A_n$, где k - коэффициент, зависящий от характеристики противодействующего усилия.

В зависимости от технологических процессов, в которых используются ЛЭМД, могут быть приняты и другие критерии оценки их магнитных систем. Так, для электромагнитных погружных насосов, вибраторов для уплотнения бетона, скважинных виброисточников накладываются ограничения на внешний диаметр устройств. Поэтому в данном случае в качестве удельных показателей целесообразно принять отношения интегральной работы и максимального тягового усилия к площади поперечного сечения ЛЭМД [234].

Предлагаемые критерии позволяют провести предварительное сравнение импульсных линейных электромагнитных двигателей, которое нередко бывает окончательным.

С этой целью использован большой экспериментальный материал, включающий свыше 300 ЛЭМД длинноходового типа, с комбинированным якорем, зубцовым магнитопроводом, многократно используемым и поперечным магнитными потоками [10; 113; 120; 234] и около 200 других типов, полученных различными исследователями [131; 212; 224; 236]. Сравнивались ЛЭМД при питании их обмоток постоянным напряжением, так как они по предлагаемым критериям существенно превосходят ЛЭМД переменного напряжения [131].

При одинаковых конструктивных размерах и одинаковом эффективном значении тока тяговые усилия ЛЭМД для постоянного, однофазного и трехфазного напряжений относятся как 2:1:1,5. Кроме того, применению ЛЭМД переменного напряжения в отдельных случаях могут препятствовать такие факторы, как значительная кратность пускового тока, достигающая 15...30-кратного значения от номинального тока при притянутом якоря, пониженная (по сравнению с ЛЭМД постоянного тока) надежность, нестабильность силовых и энергетических характеристик, определяемая случайным характером момента включения к питающей сети.

Анализ реализованных на практике конструкций импульсных ЛЭМД показал значительное различие их технико-экономических показателей при выполнении одинаковых технологических операций с одинаковыми значениями усилий и ходов. Это объясняется, по нашему мнению, следующими причинами: несоответствием между видом технологической операции, формой тяговой характеристики, номинальными величинами усилия и хода, неоптимальной конструкцией электромагнитного двигателя. В связи с этим целесообразно устанавливать соответствие между видом технологической операции и типом магнитной системы двигателя.

Покажем это на примере прессового оборудования с линейным электромагнитным приводом. Каждая группа технологических операций холодной штамповки характеризуется определенным диапазоном изменения хода рабочего инструмента и видом силовой диаграммы. Предлагается разделить по вели-

чине хода все технологические операции холодной штамповки на две группы. К первой группе, требующей сравнительно малого перемещения рабочего инструмента, относятся резка, вырубка, пробивка, просечка, чеканка, клеймение. Ко второй группе, требующей больших ходов, относятся гибка, вытяжка, правка, формовка, высадка.

Для первой группы целесообразно использовать электромагнитные двигатели короткоходового типа: с внешним притягивающимся якорем, с втягивающимся якорем без стопа и с различной формой якоря и стопа. Характеристика тягового усилия электромагнитных двигателей этой группы имеет гиперболический вид. Однако вид ее можно изменить за счет отдельных элементов магнитной цепи, степени их насыщения, схемы питания.

ЛЭМД с внешним притягивающимся якорем можно эффективно использовать для листоштамповочных операций, в частности, для электромагнитных штампов, в которых основные элементы штампа одновременно являются магнитопроводами двигателя.

Для операций второй группы рекомендуется использовать ЛЭМД длинноходового типа. К ним относятся броневого типа ЛЭМД втяжного типа, работающие на потоках рассеяния, и ЛЭМД с поперечно движущимся якорем. Первый тип длинноходовых ЛЭМД имеет пологую форму тягового усилия на большей части хода. Исследования ЛЭМД с поперечно движущимся якорем, имеющим максимумы силы в начальной части рабочего хода, позволяет рекомендовать их для привода высокоскоростных универсальных прессов [10].

Линейные электромагнитные двигатели с комбинированным якорем занимают промежуточное положение между коротко- и длинноходовыми ЛЭМД и могут быть рекомендованы для прессов универсального назначения.

В связи с классификацией технологических операций, реализуемых с помощью импульсных ЛЭМД, по величине хода и форме тяговой характеристики сравниваемые ЛЭМД были разделены на короткоходовые, длинноходовые и универсальные и представлены шестью подгруппами: короткоходовые с внешним притягивающимся якорем, с втягивающимся якорем, длинноходовые с втягивающимся якорем, универсальные ЛЭМД с комбинированным якорем, ЛЭМД с поперечно движущимся якорем и с многократным использованием магнитного потока. Так как непосредственное использование данных для сравнения затруднительно из-за того, что внутри каждой из подгрупп исследованные ЛЭМД различались геометрическими соотношениями основных размеров, массой, габаритами, обмоточными данными, конструктивными особенностями элементов магнитной цепи, область применения, то зависимости $a_{иу}=f(m_э)$, и $f'_{эм}=f(m_э)$ представлены графически в виде зон, отражающих диапазон изменения соответствующих критериев для каждой из подгрупп ЛЭМД (1 – 6 на рис. 2.8 а, б).

При построении указанных зависимостей удельные показатели $a_{иу}$, $f'_{эм}$ приводились к одинаковому превышению температуры $\tau=80^\circ \text{C}$ по методике, изложенной в [10].

Рис. 2.8 а, б с приведенными значениями удельных показателей $a_{\text{ив}}$, $f_{\text{эм}}$ отражает достигнутый уровень по сравниваемым критериям для электромагнитных двигателей при естественном охлаждении и тенденцию их изменения с ростом активной массы электромагнитных двигателей.

Из анализа рис. 2.8 а видно, что удельная интегральная работы ЛЭМД с комбинированным якорем (кривая 5) выше, чем у ЛЭМД других подгрупп (кривые 1-4, 6), для которых в некоторой части критериальных зон этот критерий практически соизмерим. При этом более близкими по этому критерию будут ЛЭМД с втягивающимся якорем (кривые 2, 3) (коротко- и длинноходовые) и ЛЭМД с МИМП (кривые 6). ЛЭМД с поперечно движущимся якорем (кривые 4) по этому критерию уступает в отдельных случаях остальным ЛЭМД. В известной степени это объясняется тем, что исследованные ЛЭМД этой подгруппы имели нерациональные геометрические соотношения между основными размерами вследствие малоизученности этого вопроса.

Рис. 2.8 б показывает, что по удельной максимальной силе тяги ЛЭМД с комбинированным якорем превосходят ЛЭМД длинноходовой подгруппы и короткоходовые с втягивающимся якорем, а также короткоходовые с внешним притягивающимся якорем. Наименьшее значение этот показатель имеет у длинноходовых ЛЭМД, что объясняется формой тяговой характеристики. ЛЭМД с МИМП по удельной максимальной силе тяги превосходят подгруппы длинноходовых ЛЭМД с втягивающимся и поперечно движущимся якорем.

Общая тенденция снижения этого показателя с ростом активной массы ЛЭМД всех типов объясняется тем, что сила тяги с изменением размеров ЛЭМД отстает в росте от массы (сила тяги пропорциональна квадрату линейных размеров, а масса – кубу).

Приведенные на рис. 2.8 а, б зависимости позволяют обобщенно по каждой из подгрупп ЛЭМД судить об их эффективности по указанным критериям. В случае соизмеримости диапазонов изменения критериев (перекрывание зон) у сравниваемых ЛЭМД разных подгрупп необходимо сопоставление указанных зависимостей при одинаковых рабочих зазорах при оптимальной геометрии.

В работе [96] приведены результаты сравнения рассмотренных подгрупп магнитных систем ЛЭМД по критериям $a' = A_{\text{н}}/S$, $f' = F_{\text{эм}}/S$, где S - площадь поперечного сечения ЛЭМД.

По приведенной интегральной работе и при относительно небольших сечениях этот критерий практически соизмерим для ЛЭМД с МИМП, длинноходовых и с комбинированным якорем. Им уступают короткоходовые ЛЭМД с втяжным и притягивающимся якорем. Наименьшее значение этот показатель имеет у подгруппы ЛЭМД с поперечно движущимся якорем.

С увеличением сечения указанный критерий у магнитных систем длинноходовых ЛЭМД выше, чем у остальных подгрупп и в большей части зоны соизмерим с ЛЭМД с комбинированным якорем.

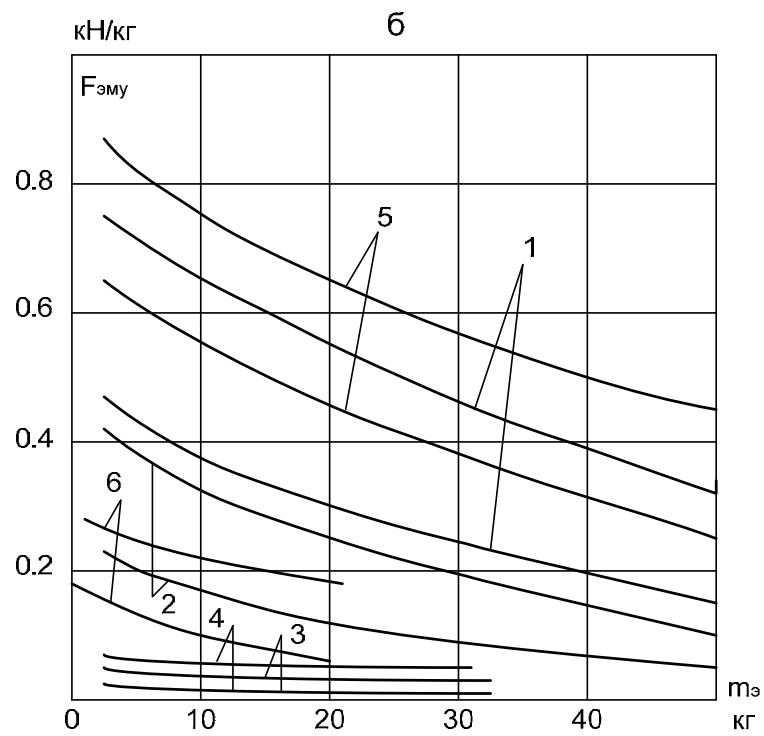
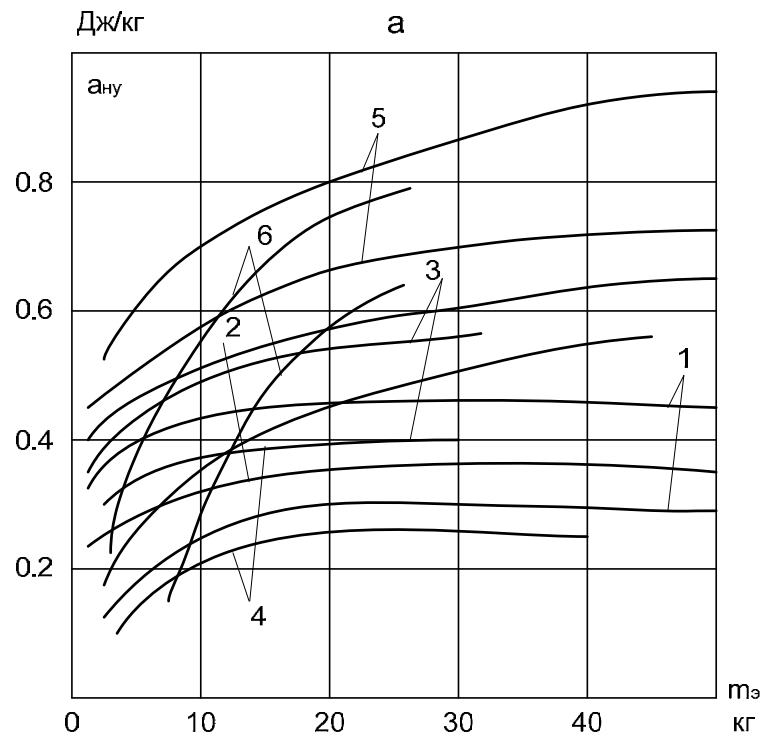


Рис. 2.8. Диапазоны изменения удельных приведенных значений интегральной работы и максимального тягового усилия ЛЭМД разных групп

По приведенной максимальной силе тяги магнитные системы ЛЭМД с МИМП превосходят все остальные подгруппы и в большей части зоны соизмеримы с ЛЭМД с комбинированным якорем и с короткоходовыми с притягивающимся якорем.

Как показано в работах [5; 298], в качестве критериев оценки эффективности магнитных систем короткоходовых ЛЭМД с втяжным якорем и различными конструкциями направляющих устройств использованы кратность отношения m максимальной индуктивности L_{\max} к минимальной L_{\min} и потери мощности. Исследования позволили выявить рациональные конструкции направляющих устройств, позволившие повысить КПД и удельную энергию удара ЛЭМД.

В сравнительной оценке типов магнитных систем ЛЭМД при проектировании конкретных СЭМИС помимо приведенных критериев следует учитывать и другие показатели, имеющие существенное значение при реализации и эксплуатации СЭМИС: простоту и технологичность изготовления, надежность, эргономические показатели и т.д.

3. КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ УДАРНЫХ МАШИН С ЛЭМД

Накопленный опыт теоретических, экспериментальных и эксплуатационных исследований ЛЭМД свидетельствует о большом многообразии конструктивных схем ударных машин и устройств в ЭМД, существенно отличающихся друг от друга по способу организации возвратно-поступательного движения ударной массы (бойка). Существуют также различные принципы классификации ЛЭМД, обеспечивающие возможность наиболее полного отражения эксплуатационных и конструктивных свойств с учетом взаимных связей электрической, магнитной и механической системы двигателя [28; 31; 75]. Как правило, конструктивные схемы ЛЭМД выбираются из условий и требований, определяемых технологическим процессом, для выполнения которого предназначена машина. Из анализа реализованных на практике конструкций импульсных ЛЭМД также следует значительное различие их технико-экономических показателей при выполнении одинаковых технологических операций с одинаковыми значениями усилий и ходов, что можно объяснить несоответствием между видом технологической операции, формой тяговой характеристики, номинальными величинами усилия и хода, нерациональной конструкцией электромагнитного двигателя.

В соответствии с классификационными признаками существует около тысячи разнообразных конструктивных схем машин с ЛЭМД, и усовершенствование их продолжается. Поэтому оценить рациональность того или иного типа ЛЭМД по способу получения возвратно-поступательного движения бойка на основе анализа электромеханических параметров, тем более на основе детального анализа конструктивных схем, к сожалению, не представляется возможным. Однако если из всего многообразия электромагнитных импульсных машин, представленных в литературных и патентных материалах, ограничиться устройствами, получившими практическое применение, то вполне обоснованно можно ограничиться двумя, тремя принципиальными схемами для каждой группы устройств, классифицированных в соответствии с характером выполняемых технологических операций (табл. 1.6) [63].

Различные по конструкции машины могут иметь одинаковые выходные характеристики. Критерием эффективности применения той или иной схемы машины являются их удельные показатели, которые, как следует из анализа, даже у машин, относящихся к одной группе, но различающихся по способу получения возвратно-поступательного движения бойка, могут быть различны.

Как известно, все параметры машин обусловлены взаимной связью электрической и механической систем. Естественным является стремление построить такую взаимную связь, в которой для приведения в движение ударной массы необходимое число промежуточных устройств было бы минимальным.

Движение ударной массы обеспечивается электромагнитными силами и вызвано тем, что при взаимодействии магнитного поля катушки с ударной мас-

сой, система стремится к состоянию магнитного равновесия. Если ударную массу периодически выводить из этого состояния, то под действием электромагнитных сил она будет возвращаться в исходное положение. Вывод ударной массы из положения магнитного равновесия может быть осуществлен либо изменением самого положения магнитного равновесия (например, применением многообмоточной схемы), либо с помощью специальных механических устройств (например, с помощью упругого возвратного элемента).

Совокупность последовательно протекающих электромагнитных и механических процессов, повторяющихся идентично во времени, образуют законченный рабочий цикл электромагнитного двигателя. Рабочий процесс машины в течение рабочего цикла определяет отношение длительности действия электромагнитных сил, приложенных к якорю, ко времени его движения при совершении холостого или рабочего хода. Анализ рабочих процессов различных машин указывает на непосредственную связь эффективности преобразования энергии, полученной от источников, в механическую энергию с режимами их работы [5; 13; 28; 31]. Существование этой взаимосвязи выражается в изменении значений энергетических параметров (энергии единичного удара, частоты ударов, полезной мощности и КПД), а также удельных массовых показателей, величина которых является основным критерием оценки совершенства устройства.

По характеру приложения нагрузки в течение цикла машины ударного действия относятся к устройствам с односторонней нагрузкой. По конструктивному исполнению ударные машины выполнены, в основном, по одно- и двухобмоточным схемам с упругими связями (возвратные упругие элементы, буферные устройства) или без них. При этом независимо от типа машины рабочие процессы, протекающие в них, имеют особенности, обусловленные положением и состоянием ударной массы бойка (якоря) в момент приложения электромагнитного импульса сил.

Дадим краткое описание различных типов конструктивных схем электромагнитных машин ударного действия с ЭМД, обладающих более высокими энергетическими показателями и получивших наибольшее распространение в практике проектирования. Проанализируем возможности каждой из представленных схем в совершении механической работы в рабочем цикле машины.

3.1. СИНХРОННАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МАШИНА С ОДНОКАТУШЕЧНЫМ ЛЭМД СО СВОБОДНЫМ ВЫБЕГОМ ЯКОРЯ

По схеме однокатушечного ЛЭМД со свободным выбегом якоря (рис. 3.1) выполнена конструкция электромагнитного молотка МС-18/36М (изготовитель завод «Электродеталь» г. Саратов). Электромагнитный двигатель работает от однофазной сети с однополупериодным управлением обмоткой.

Стремление повысить удельные массовые показатели привело к созданию схем питания, в которых для осуществления прямого и обратного хода якоря, исполняющего функции ударной массы, используются одни и те же катушки. При работе двигателя (рис. 3.1) в первый момент времени t_1 после удара положительный полупериод тока i_{xx} , протекающий по катушке 1, увлекает якорь 2 в сторону буферного устройства, выполненного в виде пружины 3. За начало координат принято положение якоря, соответствующее рис. 3.1.

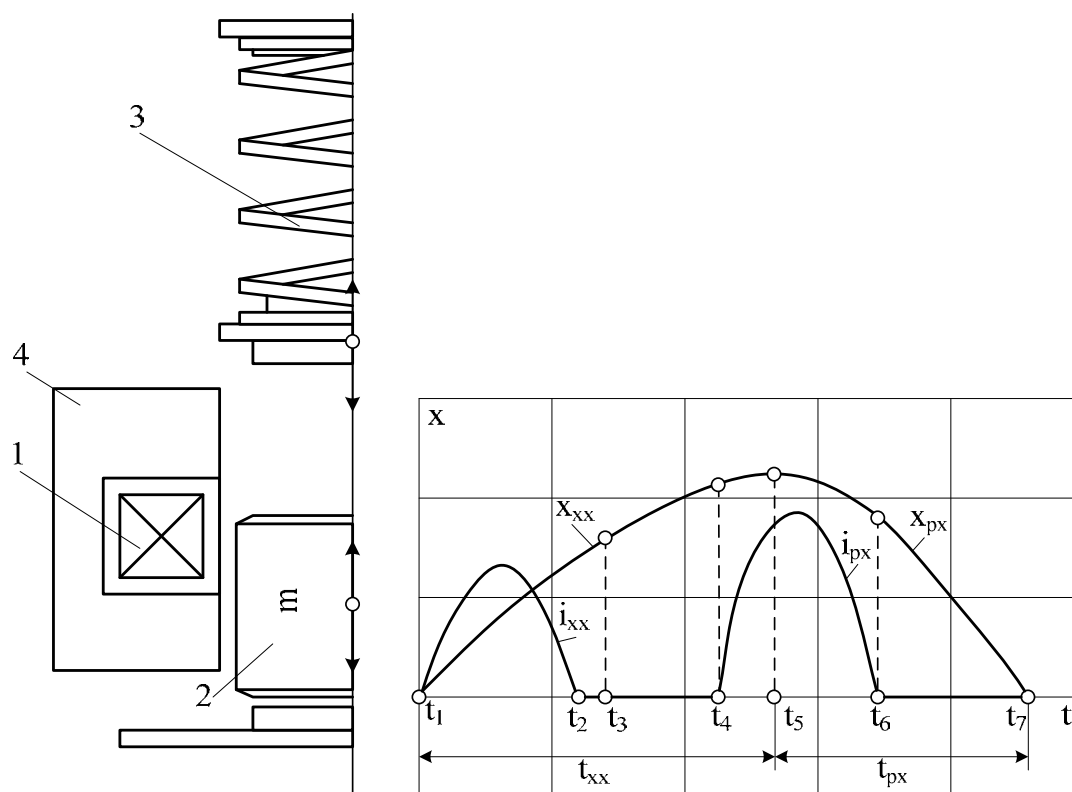


Рис. 3.1. Конструктивная схема однокатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом якоря

Пружина двигателя соединена с якорем не жестко и действует на него только в определенные моменты времени. Рабочий процесс ЛЭМД рассчитывается так, что при подходе якоря к положению магнитного равновесия протекание тока i_{xx} в катушке прекращается, и якорь по инерции на интервале времени $t_2 \dots t_3$ продолжает движение в том же направлении при обесточенной катушке, обеспечивая рабочий зазор со стороны нижнего полюса магнитопровода 4. Подойдя к буферной пружине в момент времени t_3 , якорь сжимает ее на интервале времени $t_2 \dots t_5$.

Далее под действием упругих сил пружины и электромагнитных сил в воздушном зазоре, вызванных приходом следующего положительного полупериода тока i_{px} , якорь изменяет знак скорости на противоположный и за время рабочего хода $t_5 \dots t_7$ наносит удар, обеспечивая рабочий зазор со стороны верх-

него полюса магнитопровода. Далее цикл повторяется. Таким образом, одна и та же катушка используется в электромагнитной машине со свободным выбегом якоря для прямого и обратного хода. ЛЭМД совершает 1500 уд/мин, поскольку полный рабочий цикл осуществляется за время двух периодов приложенного напряжения. В соответствии с циклом (рис.3.1) на интервале рабочего хода уравнение энергобаланса имеет вид:

$$\int_{t_5}^{t_7} (ui - i^2 r) dt = \int_{t_5}^{t_7} F_{ЭМ} V dt + \Delta W(x, t), \quad (3.1)$$

где u , i , $F_{ЭМ}$, V - мгновенные величины напряжения, тока, электромагнитного усилия, скорости якоря; r – активное сопротивление обмотки; $\Delta W(x, t)$ - приращение энергии магнитного поля за время движения.

Однако в представленном виде уравнение энергобаланса отражает только распределение энергии, поступившей в систему от источника за время движения, и не позволяет учесть работу внешних сил. Для отражения в (3.1) работы внешней упругой силы пружины, направленной согласно с электромагнитным усилием, воспользуемся уравнением равновесия сил:

$$m \frac{dV}{dt} = F_{ЭМ} - F_C - F_{П}, \quad (3.2)$$

где F_C , $F_{П}$ - силы, вызванные сопротивлением трения движения и усилием пружины.

Подстановка (3.2) в (3.1) позволяет перейти к уравнению энергобаланса с учетом действия внешней силы:

$$\int_{t_5}^{t_7} (ui - i^2 r) dt + \int_{t_5}^{t_7} F_{П} V dt = \int_{V_1}^{V_2} m V dV + \int_{t_5}^{t_7} F_C V dt + \Delta W(x, t). \quad (3.3)$$

Первый член правой части (3.3) представляет собой кинетическую энергию ударной массы и определяет полезную работу за полный цикл. Следует отметить, что в организованном таким образом рабочем цикле полезная энергия за время рабочего хода может превышать энергию, полученную от источника, на величину второго слагаемого левой части уравнения (3.3), определяющего работу внешней силы.

Особенностью рабочего процесса за время полного цикла $t_1 \dots t_7$ является торможение якоря в режиме противовключения на одном из участков его хода (на интервале $t_4 \dots t_5$), вызывающее повышение амплитуды тока. Величина выбега якоря является одним из главных условий, определяющих режим работы ЛЭМД и его энергетику.

Достоинством рабочих циклов со свободным выбегом бойка при использовании однокатушечных ЛЭМД является возможность создания электромагнитных машин с высокими удельными характеристиками и пониженной до

25 с⁻¹ частотой ударов. Подобная конструкция проста по исполнению, содержит минимальное число элементов. Отличается простотой и система управления, содержащая единственный полупроводниковый диод. Однако неустойчивый запуск электромагнитного двигателя при остановке якоря в положении, близком к магнитному равновесию, снижает целесообразность применения рабочих циклов со свободным выбегом в повторно-кратковременных режимах работы.

3.2. СИНХРОННАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МАШИНА С ДВУХКАТУШЕЧНЫМ ЛЭМД С ПОСТОЯННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ

Конструкции синхронных электромагнитных машин, выполненные по двухкатушечной схеме, получили наибольшее распространение среди многокатушечных устройств. Основное применение такая конструктивная схема получила в ручных электромагнитных машинах ударного действия. По данной схеме (рис. 3.2) выполнены электромагнитные молотки ИЭ-4207, ИЭ-4210 и перфораторы ИЭ-4709, ERP-1000 (производственная фирма DauER Латвийской республики). Возвратно-поступательное движение якоря в таких ЛЭМД совершается под действием электромагнитных сил катушки рабочего хода и сил буферного устройства, а холостой под действием электромагнитных сил катушки холостого хода. Синхронизация движения якоря, не имеющего механической связи с буфером, с питающим напряжением осуществляется за счет постоянного воздействия электромагнитных сил. Схема питания обеспечивает поочередное питание катушек от однофазной сети с однополупериодным управлением. В отличие от конструктивной схемы, приведенной на рис 3.1, для питания катушек используется поочередно обе полувольты питающего напряжения. Изменение направления движения якоря осуществляется с помощью механического реверсирующего устройства, выполненного в виде подпружиненного инерционного ударного буфера.

Работу ЛЭМД рассмотрим с момента времени, соответствующего подаче полувольты напряжения на катушку холостого хода 1 при обесточенной катушке рабочего хода 2 и положении якоря 3 (рис. 3.2). Из диаграммы рабочего процесса следует, что за время $t_1 \dots t_2$ в катушке холостого хода протекает полупериод тока i_{xx} и совершается холостой ход якоря. ЛЭМД работает в двигательном режиме. Якорь движется в сторону буфера, содержащего инерционную массу 4 и пружину 5. По завершению полупериода тока i_{xx} на интервале $t_2 \dots t_3$ якорь наносит удар по встречно движущейся инерционной массе и отдает часть своей кинетической энергии, которая затем преобразуется в потенциальную энергию пружины.

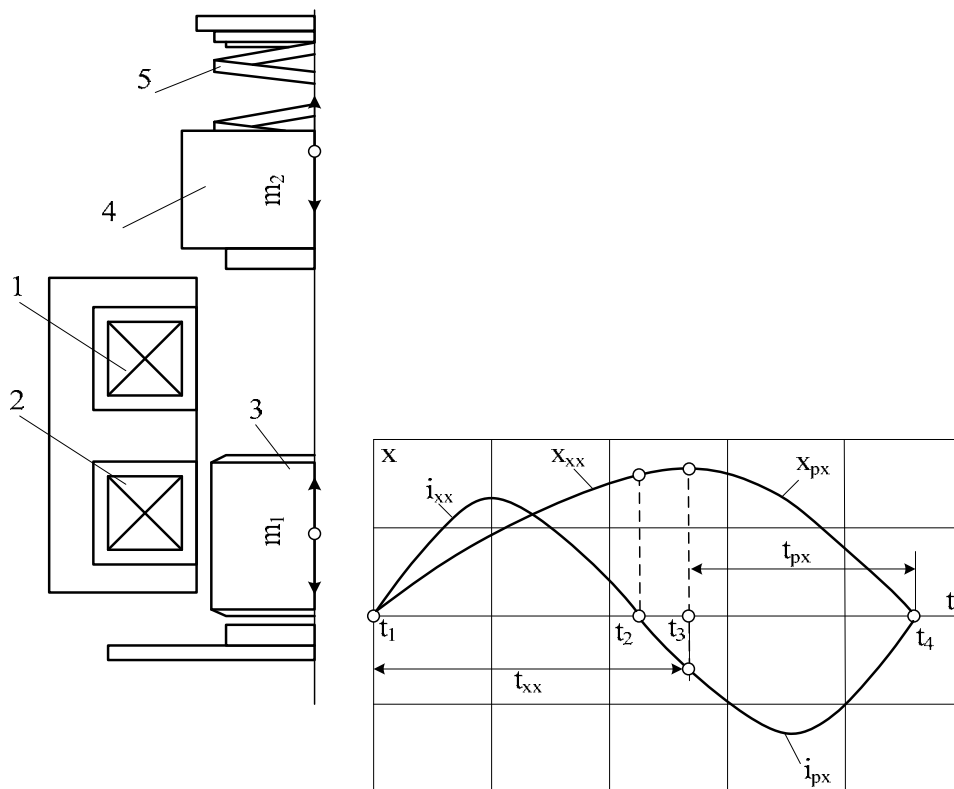


Рис. 3.2. Конструктивная схема двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным буфером, где m_1 – масса якоря; m_2 – инерционная масса механического буфера; $m_1 < m_2$

Период $t_2 \dots t_3$ определяет завершающую стадию холостого хода и характеризуется началом протекания тока i_{px} в катушке рабочего хода, а также снижением до нуля скорости якоря. На интервале времени $t_2 \dots t_3$ электромагнитные силы за счет действия импульса тока i_{px} тормозят перемещения якоря, и двигатель работает в режиме противовключения. За время $t_3 \dots t_4$ якорь совершает рабочий ход под действием электромагнитных сил от протекающего тока i_{px} катушки рабочего хода. Далее цикл повторяется. Двухкатушечные ударные узлы с постоянным воздействием тягового усилия позволяют получать частоту ударов, равную частоте питающей сети (50 с^{-1}).

Для данного цикла уравнение энергобаланса в период рабочего хода на интервале времени движения якоря $t_3 \dots t_4$ будет иметь вид:

$$\int_{t_5}^{t_7} (ui - i^2 r) dt + \frac{mV_0^2}{2} = \int_{V_1}^{V_2} mV dV + \int_{t_5}^{t_7} F_C V dt + \Delta W(x, t), \quad (3.4)$$

где V_0 – начальная скорость якоря, приобретенная в результате удара с инерционной массой m_2 буферного устройства посредством энергообмена.

Из (3.4) следует, что полезная энергия на выходе в период рабочего хода может превышать энергию источника, как и в схеме на рис 3.1, на величину второго слагаемого левой части уравнения энергетического баланса системы.

Особенностью рабочего процесса в течение времени полного цикла является торможение якоря в режиме противовключения в период холостого хода, а также работа буферного устройства, осуществляющего энергообмен между якорем и инерционной массой и обеспечивающего тем самым начальную скорость якорю в период рабочего хода.

3.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МАШИНА С ОДНОКАТУШЕЧНЫМ ЛЭМД ПРОСТОГО И ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ

Основное применение конструктивные схемы с однокатушечными ЛЭМД простого и двойного действия получили в мощных ударных машинах, рассчитанных на энергию 200 Дж и выше. По данным схемам (рис. 3.3 и рис. 3.4) выполнены электромагнитные молоты, рассмотренные в [12].

В первом варианте машин (рис. 3.3) с ЛЭМД простого действия рабочий ход якоря осуществляется только за счет гравитационных сил, обусловленных силой тяжести ударной массы, а холостой ход под действием электромагнитных сил. Функционирование двигателя в заданном режиме ограничено требованием работы при вертикальном положении якоря.

Принцип работы машины заключается в подаче напряжения на катушку 1 и подъеме якоря 2 массой m на определенную высоту. На первом интервале времени $t_1 \dots t_2$, начиная с момента включения ЛЭМД, якорь совершает холостой ход. В момент времени t_2 , когда якорь достигает верхнего полюса, катушка отключается. На интервале времени $t_2 \dots t_3$ движение якоря осуществляется вверх по инерции при обесточенной катушке, а затем на интервале $t_3 \dots t_4$ под действием сил тяжести массы якоря.

Полезная энергия за рабочий ход будет зависеть от энергии, запасаемой в системе в период холостого хода при подъеме якоря. Соответствующее рабочему ходу уравнение энергобаланса при обесточенной обмотке будет определяться только состоянием механической системы:

$$mg(x_1 - x_2) = \int_{V_1}^{V_2} mVdV + \int_{t_5}^{t_7} F_C Vdt.$$

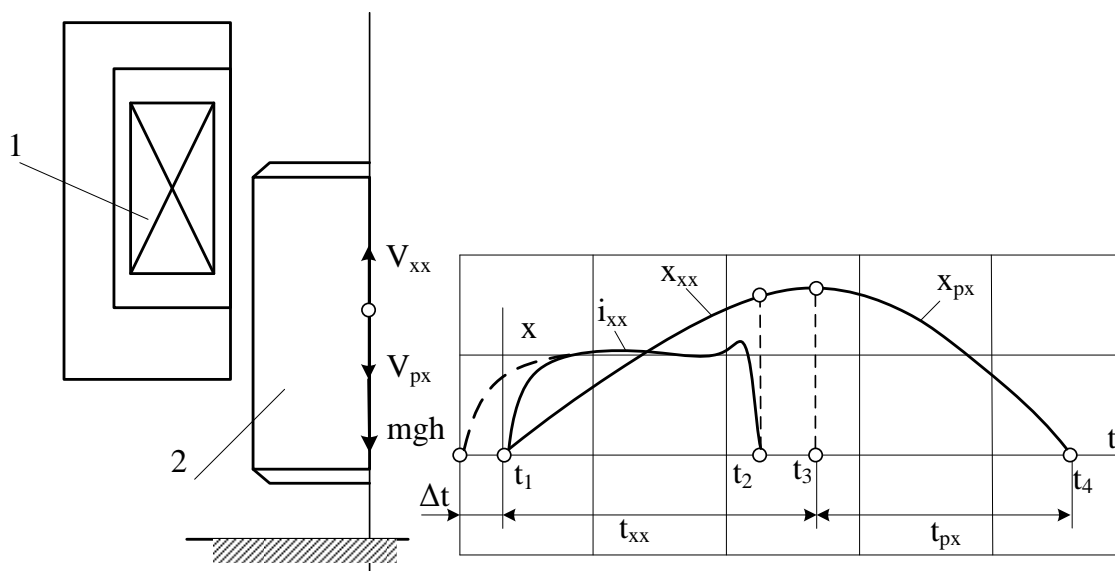


Рис. 3.3. Конструктивная схема электромагнитной машины с однокатушечным ЛЭМД простого действия

В рассмотренном цикле при определенных соотношениях времени накопления (аккумуляции) потенциальной энергии в период холостого хода и ее реализации в период рабочего хода можно получать импульсную мощность, превосходящую мощность источника. В этом случае при определенных соотношениях времени накопления Δt_1 и реализации Δt_2 этой энергии происходит соответствующая трансформация мощностей P_1 и P_2 [175]:

$$P_1 \Delta t_1 = P_2 \Delta t_2.$$

Для увеличения ударной мощности двигателя за счет частоты удара включение катушки может быть осуществлено до завершения удара с тем, чтобы создать силу тяги, необходимую для подъема якоря в период холостого хода [12]. При этом длительность протекания тока в катушке увеличивается на время Δt (рис. 3.3).

Так как длительность интервала мала, скорость якоря не успевает значительно уменьшиться. В то же время начальная электромагнитная сила успевает возрасти до значения, необходимого для увлечения якоря после удара. Это позволяет частично использовать энергию отскока якоря после нанесения удара на интервале холостого хода.

Во втором варианте машин с однокатушечным ЛЭМД двойного действия, режим работы возможен в тех случаях, когда при движении вверх якорь выходит из нижнего полюса (рис. 3.4). Если в момент времени, соответствующий максимальному верхнему положению якоря 1, включить катушку 2, то движение вниз будет осуществляться под действием электромагнитной силы и силы тяжести ударной массы.

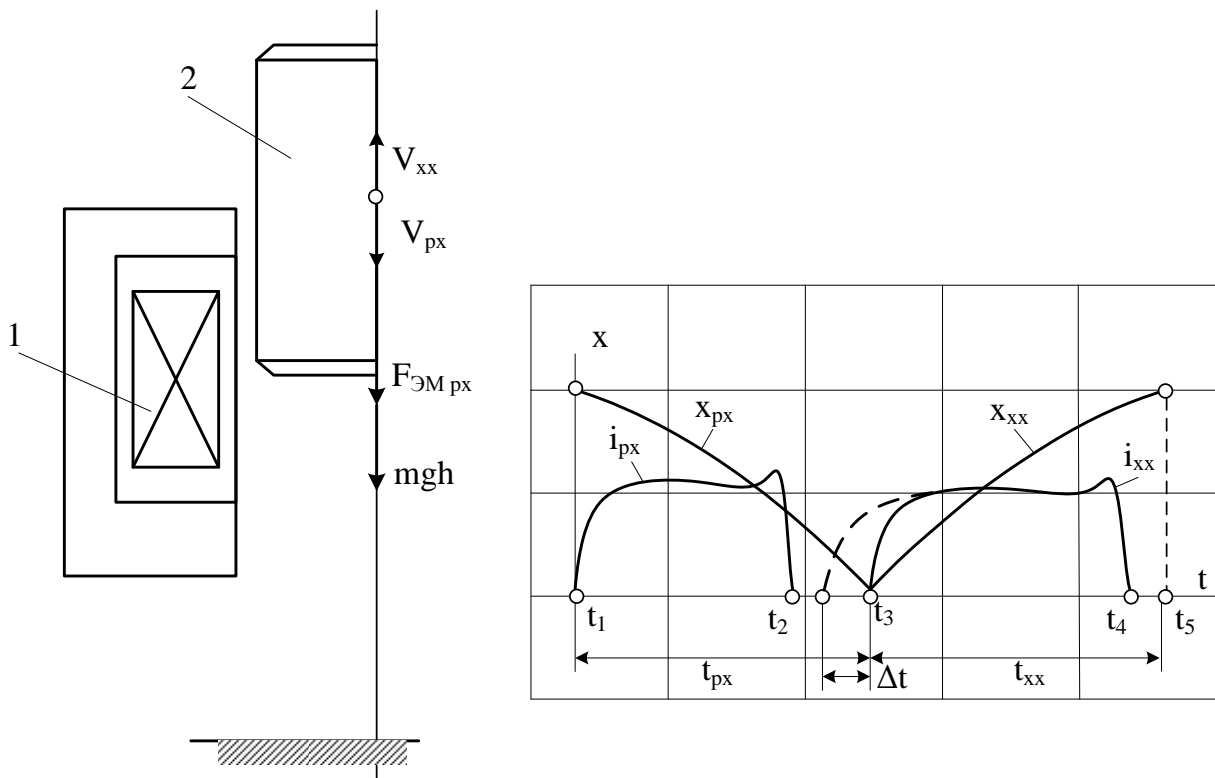


Рис. 3.4. Конструктивная схема электромагнитной машины с однока-
тушечным ЛЭМД двойного действия

Режим работы ЛЭМД рассмотрим с момента времени t_1 , соответствующе-
го крайнему верхнему положению якоря. Если в данный момент времени вклю-
чить катушку, то движение вниз на интервале времени $t_1 \dots t_2$ будет осущест-
вляться под действием электромагнитной силы и гравитационной силы, запасен-
ной системой в предыдущем цикле энергопреобразования. Отключение катуш-
ки происходит в момент времени t_2 , когда якорь достигает нижнего полюса.
Дальнейшее движение на интервале $t_2 \dots t_3$ осуществляется только за счет силы и
инерции и силы тяжести ударной массы. После удара на интервале времени
 $t_3 \dots t_4$ так же, как и в конструктивной схеме на рис 3.3, осуществляется холо-
стой ход под действием электромагнитных сил включенной катушки. В момент
времени t_4 при подходе якоря к верхнему полюсу катушка обесточивается.

Дальнейшее движение якоря на интервале $t_4 \dots t_5$ осуществляется при от-
ключенной катушке по инерции вверх до тех пор, пока скорость не станет рав-
ной нулю. Далее цикл повторяется.

В соответствии с рабочим циклом уравнение энергодбаланса в период ра-
бочего хода можно представить в виде:

$$\int_{t_1}^{t_3} (ui - i^2 r) dt + mg(x_1 - x_2) = \int_{V_1}^{V_2} mVdV + \int_{t_1}^{t_3} F_C V dt + \Delta W(x, t). \quad (3.5)$$

Второй член левой части (3.5) представляет энергию, аккумулируемую в
системе к началу рабочего хода.

Как и в схеме на рис. 3.3, увеличение длительности протекания тока в катушке на время Δt , то есть за счет ее включения для обеспечения возврата якоря до совершения удара, позволяет использовать для совершения полезной работы энергию отскока якоря при ударе.

3.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МАШИНА С ДВУХКАТУШЕЧНЫМ ЛЭМД ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ

Конструктивная схема, изображенная на рис. 3.5, нашла основное применение в электромагнитных молотах с энергией удара более 1000 Дж. По этой схеме выполнены молоты МЭМ-600, МЭМ-1000, МЭМ-3000 [12; 48; 49]. Особенностью этой конструктивной схемы является то, что рабочий и холостой ход якоря осуществляется под действием электромагнитных сил катушки рабочего и холостого хода [12].

Рабочий цикл ЛЭМД осуществляется при поочередном запитывании катушки холостого хода 1 и катушки рабочего хода 2. При включении катушки холостого хода якорь 3 движется вверх. При подходе к верхнему полюсу происходит отключение катушки холостого хода и включение катушки рабочего хода. Якорь под действием электромагнитных сил катушки рабочего хода и силы тяжести якоря перемещается вниз. Якорь наносит удар, и далее цикл повторяется.

Полезная энергия в течение цикла в данной схеме в значительной степени зависит от составляющей энергии, запаасаемой якорем в период холостого хода. Тогда для варианта схемы, приведенной на рис 3.5 а, имеем

$$\int_{t_2}^{t_3} (ui - i^2 r) dt + mg(x_1 - x_2) = \int_{V_1}^{V_2} mVdV + \int_{t_2}^{t_3} F_C V dt + \Delta W(x, t). \quad (3.6)$$

Таким образом, полезная энергия на выходе, реализуемая в виде энергии ударного импульса, на основании уравнения энергобаланса будет определяться двумя равноценными составляющими:

$$mg(x_1 - x_2) + \int_{t_2}^{t_3} F_{ЭМ} V dt = \frac{mV^2}{2} + \int_{t_2}^{t_3} F_C V dt.$$

В зависимости от момента подачи тока в катушку возможны различные варианты работы ЛЭМД в цикле. В первом случае включение катушки рабочего хода совпадает с началом рабочего хода (рис. 3.5 а). Рабочий ход начинается в момент времени t_2 при нулевом значении тока $i_{рх}$. Катушка холостого хода включается после удара в момент времени t_3 после окончания протекания тока в катушке рабочего хода.

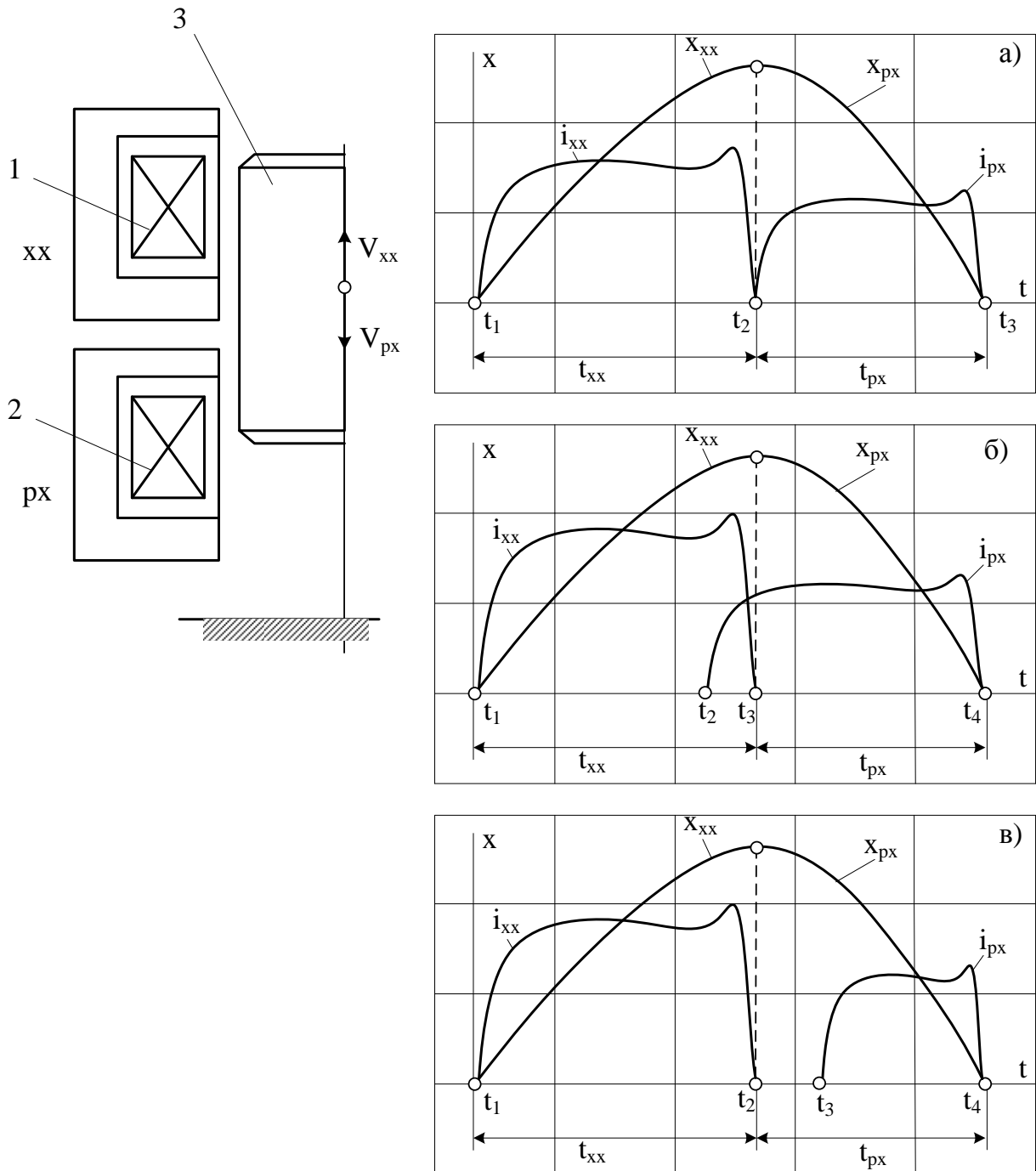


Рис. 3.5. Конструктивная схема электромагнитной машины с двухкатушечным ЛЭМД двойного действия

Во втором варианте работы ЛЭМД (рис. 3.5 б) ток в катушке рабочего хода i_{px} протекает еще при холостом ходе якоря. Рабочий ход начинается при начальном значении тока i_{px} . Двигатель на интервале времени $t_2 \dots t_3$ работает в режиме противовключения. Катушка холостого хода отключается при походе якоря к верхнему полюсу в момент времени t_3 .

В третьем варианте ЛЭМД, выполненного по схеме, изображенной на рис. 3.5 в, электромагнитная сила начинает действовать уже после начала рабочего хода под действием сил тяжести якоря.

На интервале времени $t_2 \dots t_3$ обе катушки двигателя находятся в обесточенном состоянии. Дальнейшая работа ЛЭМД аналогична рабочим циклам, приведенным на рис. 3.5 а и б.

Выражения энергобаланса (3.1), (3.3), (3.6), соответствующие интервалу движения, нуждаются в следующих пояснениях. Дифференциальная форма энергобаланса в процессе движения имеет вид:

$$(ui - i^2 r) dt = id\psi = dW_{\text{ЭМ}},$$

где $dW_{\text{ЭМ}}$ – элементарная электромагнитная энергия, характеризуемая электромагнитной мощностью $i \frac{d\psi}{dt}$, обусловленной наличием магнитного поля (ток i) и вихревого электрического поля (напряжение $u = \frac{d\psi}{dt}$) в процессе движения.

Элементарная электромагнитная энергия состоит из элементарной механической энергии и части элементарной электромагнитной энергии (обменной энергии $dW_{\text{ЭМ}}^I$), невостребованной механической системой:

$$dW_{\text{ЭМ}} = F_{\text{ЭМ}} V dt + dW_{\text{ЭМ}}^I.$$

При определении энергобаланса за интервал движения дифференциальная форма энергобаланса интегрируется. При этом начальная и конечная точки характеризуются неподвижными состояниями (то есть $V=0$):

$$dW_{\text{ЭМ}}^I = dW_{\text{ЭМ}} = id\psi,$$

и при линейной магнитной цепи ($\psi = L \cdot i$) получим:

$$dW_{\text{ЭМ}}^I = Lidi,$$

или $W_{\text{ЭМ}}^I = \frac{Li^2}{2} + \text{const} = \frac{\psi i}{2} + \text{const}$, то есть обменная электромагнитная энергия в точках неподвижного состояния определяется запасом энергии в магнитном поле ($W_{\text{ЭМ}}^I = W_M$).

Приращение обменной энергии за время движения определяется приращением энергии магнитного поля

$$\Delta W_{\text{ЭМ}}^I = \Delta W_M = \frac{\psi_2 i_2}{2} - \frac{\psi_1 i_1}{2}.$$

Поэтому в (3.1), (3.3), (3.6) фигурирует приращение энергии магнитного поля, то есть понятие электромагнитной энергии отождествляется с понятием магнитной энергии.

Кроме рассмотренных схем известны их различные модификации. Отметим принципиальные отличия их от схем, изображенных на рис. 3.1...3.5, данные схемы по принципу действия и организации рабочего цикла практически идентичны. Отличие имеется в некоторых усовершенствованиях элементов конструкции ЛЭМД, таких как форма якоря, конфигурация магнитной цепи, расположение и геометрия катушек, вид буферного устройства холостого хода, накапливающего и возвращающего кинетическую энергию якоря, буферного устройства передачи энергии при ударе и т.д. Например, только по виду буферные устройства делятся на механические, пневматические, магнитные и комбинированные. Пневматические устройства, в свою очередь, подразделяются на компрессионные, вакуумные, компрессионно-вакуумные, гидропневматические [28]. Перечисленные выше отличия следует отнести к фактору второстепенному, способствующему повышению энергетики ЛЭМД и в представляемой работе не рассматриваются. Основной целью этих усовершенствований является снижение магнитных и механических потерь, вибрации, повышение КПД, надежности, способов интенсификации охлаждения.

В рамках проводимых исследований на основе детализированных общих структурных схем ЛЭМД (3.1 ...3.5), являющихся электромеханическими преобразователями энергии, рассмотрим качественную сторону основных энергетических процессов, обусловленных принципиальными свойствами отдельных преобразовательных элементов.

Следует отметить, что в ЛЭМД традиционного исполнения импульс питающего напряжения подают на катушку двигателя в период совершения рабочего хода при статически уравновешенном якоре, а по его завершению катушку обесточивают, и якорь действием внешних сил занимает исходное положение до прихода следующего импульса питающего напряжения. Выделенные из основного большинства схемы, отличающиеся от традиционных и используемые в практике создания электромагнитных машин, позволяют получать более высокие удельные энергетические показатели. Результаты анализа рабочих процессов в этих машинах показывают, что движение якоря осуществляется при начальных условиях, обеспечивающих концентрацию потенциальной, кинетической и магнитной энергии за счет аккумуляирования ее в различных накопительных элементах машины и системах питания (индуктивных, гравитационных, инерционных, упругих) в течение относительно длительного интервала времени между импульсами, с последующей быстрой реализацией ее в виде ударного импульса в период рабочего хода. Таким образом, можно получать импульсную мощность, сопоставимую или превышающую мощность источника питания без использования для этих целей специальных внешних устройств питания, например, в виде отдельно стоящих аккумуляторов энергии.

Для синхронных электромагнитных машин (рис. 3.1) начальными условиями в период рабочего хода являются потенциальная энергия сжатой пружины, переходящая в кинетическую энергию якоря и не зависящая от источника питания в данный момент времени, и магнитная энергия, запасенная системой в период холостого хода в режиме противовключения на интервале времени $t_4 \dots t_5$. Аналогичными начальными условиями для устройств на рис. 3.2 будут являться кинетическая энергия инерционной массы буфера, осуществляющего энергообмен с якорем посредством удара, а также магнитная энергия, запасаемая системой в режиме противовключения на интервале $t_2 \dots t_3$.

Для схем на рис. 3.3 и 3.4 эффективность работы связана с изменением времени накопления (t_{xx}) и реализации энергии (t_{px}). Для однокатушечных ЛЭМД двойного действия полезная энергия на выходе также во многом определена начальным значением запасенной в индуктивностях машины в период рабочего хода в режиме противовключения на интервале времени магнитной энергии. В варианте двухкатушечного ЛЭМД двойного действия, приведенном на рис. 3.5 б, также возможна реализация рассмотренных режимов.

При работе двигателя в режиме торможения противовключением электрическая энергия, потребляемая из сети, расходуется на торможение якоря, тепловые потери и увеличение энергии магнитного поля. При этом полезная работа не производится, якорь тормозится электромагнитными силами, однако электрическая энергия из сети потребляется. Поэтому рекомендуется в рабочем цикле данный режим исключать или по возможности минимизировать его длительность [26; 28; 84]. Однако, как показал проведенный анализ конструктивных схем, машины, обладающие более высокими энергетическими показателями, в рабочем цикле используют именно этот режим.

Рассмотренные конструктивные схемы ударных устройств и реализованные алгоритмы рабочих процессов, обеспечивающих предварительное аккумулярование энергии в цикле (табл. 3.1), во многом определяют параметры двигателя и позволяют существенно повысить их удельные энергетические показатели.

Аккумулярование энергии связано со всеми энергетическими процессами ЛЭМД, обуславливает режим их работы и технико-экономические показатели. Это обстоятельство позволяет признать способы реализации рабочих процессов с промежуточным накоплением энергии в цикле в элементах конструкции двигателя одним из перспективных направлений повышения удельных энергетических показателей импульсных электромагнитных машин.

Реализация способов накопления энергии в рабочем цикле

Конструктивная схема ЭМД	Соответствие с рисунком	Вид накопительного устройства				Распределение сил в период рабочего хода	
		Магнитное	Механическое			Внешняя механическая сила	Электромагнитная сила
			Индуктивный	Пружинный	Инерционный		
Синхронная с однокатушечным ЭМД со свободным выбегом якоря	Рис.3.1	+	+	-	-	+	+
Синхронная с двухкатушечным ЭМД	Рис.3.2	+	-	+	-	+	+
С однокатушечным ЭМД простого действия	Рис. 3.3	+	-	-	+	+	-
С однокатушечным ЭМД двойного действия	Рис.3.4	+	-	-	+	+	+
С двухкатушечным ЭМД двойного действия	Рис 3.5	+	-	-	+	+	+

Для развития этого направления разработаны эффективные способы форсированного аккумулирования магнитной энергии в электромагнитных ударных машинах различных конструкций и назначений, осуществляемые как при неподвижном (табл. 3.2), так и при движущемся (табл. 3.3) якоре, позволяющие существенно повысить их удельные силовые и энергетические показатели [64-65; 68-69; 89; 94; 102].

В первом случае удельная энергия удара для отдельных экспериментальных машин выросла в 2...4 раза и составила 9...10 Дж/кг, а КПД возрос в 2 раза и приблизился к 50 % [102].

Во втором случае удельная энергия удара возросла на 25% и составила 5 Дж/кг, КПД увеличился на 20 % и составил 34 % [66; 95].

Таблица 3.2

Показатели ЛЭМД в режиме интенсификации рабочих процессов при неподвижном якоре

Тип ЛЭМД	Усилие удержания F_y , кН	Энергия удара A_y , Дж	Удельная энергия удара a_y , Дж/кг	КПД, %
ПЭМ-0,8	0	40,1	4,0	14
	0,58	80,5	9,0	28
ПЭМ-3,0	0	200	2,5	26
	5,0	800	10	46

Для реализации данных направлений перспективными являются устройства, интегрированные с ЛЭМД. В зависимости от степени интеграции объединяются магнитопроводы, источники магнитодвижущих сил, выполняющие на интервале движения якоря разнообразные функции [80; 81].

Таблица 3.3

Показатели ЛЭМД в режиме интенсификации рабочих процессов при движущемся якоре

Режим холостого хода	Энергия удара A_y , Дж	Удельная энергия удара a_y , Дж/кг	КПД, %
Без накопления магнитной энергии	320	4,0	28,3
С накоплением магнитной энергии	400	5,0	34

4. ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ЛЭМД С АККУМУЛИРОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ В СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

4.1. ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ОДНООБМОТОЧНЫХ ЛЭМД С АККУМУЛИРОВАНИЕМ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Для однообмоточных ЛЭМД с частотой воздействия до 5 Гц, у которых рабочий ход осуществляется под действием электромагнитных сил, а холостой под действием упругих сил возвратной пружины, предлагается реализация способа, обеспечивающего одновременное увеличение энергии удара и КПД за счет предварительного аккумулирования магнитной энергии в индуктивностях системы в статическом режиме (при неподвижном якоре с последующим ее использованием в рабочем цикле).

Практическая реализация способа состоит в искусственном удержании якоря двигателя внешним противодействующим усилием на этапе трогания. Процесс энергопреобразования ЛЭМД, реализующий рабочий цикл с накоплением магнитной энергии, можно охарактеризовать двумя основными этапами.

Первый этап - это этап подготовки, характеризующийся преобразованием электрической энергии источника при неподвижном якоре в энергию магнитного поля и тепловую. Полезная механическая работа при этом не совершается, ускорение подвижная система не получает, усилие в рабочем зазоре возрастает по мере увеличения тока обмотки. Механическая система некоторое время сохраняет свое равновесие за счет внешнего противодействующего усилия, приложенного к якору, которое превышает усилие в рабочем зазоре.

В указанном режиме работы ЛЭМД является статическим преобразователем электрической энергии в магнитную ($dW_{ЭМ}=dW_M$). На этой стадии рабочего цикла баланс элементарных энергий может быть представлен в виде

$$dW_C=dQ+ dW_M . \quad (4.1)$$

Таким образом, общий энергетический баланс системы можно представить как

$$\int_{t_2}^{t_1} (ui - i^2 r) dt = \int_{\psi_2}^{\psi_1} id\psi , \quad (4.2)$$

где u , i , ψ - соответственно мгновенные значения напряжения, тока, потокосцепления, r - активное сопротивление обмотки.

Электрическая энергия, поступающая из сети, расходуется только на изменение энергии магнитного поля и потери в обмотке. Энергию источника, потребляемую за время трогания $t_{\text{тр}}$, можно представить в виде:

$$W_C = \int_0^{t_{\text{тр}}} u i dt = \int_0^{t_{\text{тр}}} \frac{U^2}{r} (1 - e^{-\frac{r}{L}t}) dt. \quad (4.3)$$

Тепловыделение в обмотке за то же время работы:

$$Q = \int_0^{t_{\text{тр}}} i^2 r dt = \int_0^{t_{\text{тр}}} \frac{U^2}{r} (1 - e^{-\frac{r}{L}t})^2 dt. \quad (4.4)$$

С учетом (4.3), (4.4) и уравнения баланса элементарных энергий (4.1) энергия, накапливаемая в магнитном поле, будет определяться выражением

$$W_M = \int_0^{t_{\text{тр}}} u i dt - \int_0^{t_{\text{тр}}} i^2 r dt. \quad (4.5)$$

Вводя понятие КПД преобразования электрической энергии в магнитную и тепловую энергию, соответственно, как $\frac{W_M}{W_C}$ и $\frac{Q}{W_C}$, также получим:

$$\frac{W_M}{W_C} = \frac{\int_0^{t_{\text{тр}}} u i dt - \int_0^{t_{\text{тр}}} i^2 r dt}{\int_0^{t_{\text{тр}}} u i dt}, \quad \frac{Q}{W_C} = \frac{\int_0^{t_{\text{тр}}} i^2 r dt}{\int_0^{t_{\text{тр}}} u i dt}. \quad (4.6)$$

На рис. 4.1 приведены характеристики ЛЭМД для этапа трогания, построенные в соответствии с выражениями (4.3...4.6) на интервале времени $t = 4\tau$ относительно постоянной времени $\tau = \frac{L}{r}$.

Из характеристик следует, что энергия, потребляемая от источника, и энергия потерь в обмотке при изменении времени трогания растут в отличие от магнитной энергии, для которой процесс накопления можно считать практически законченным за время $t = (3...5)\tau$. Изменение времени трогания в большую сторону за счет искусственного удержания якоря, как это видно из рис. 4.1, нецелесообразно, так как дальнейший процесс связан только с потреблением электрической энергии и преобразованием ее в тепловую. КПД преобразования электрической энергии источника в тепловую возрастает, в то время как магнитный КПД падает.

Начало второго этапа энергопреобразования совпадает с моментом отрыва якоря. Механическая система характеризуется минимальным противодействующим усилием и ускоренным перемещением якоря.

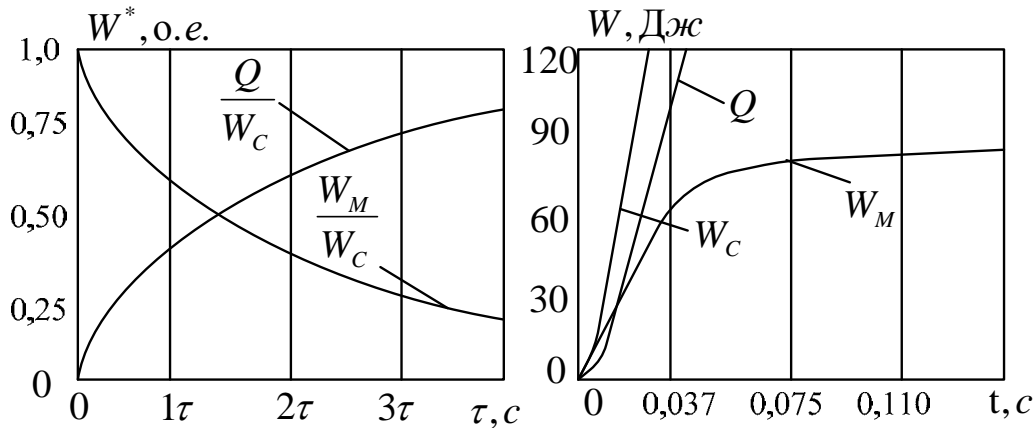


Рис. 4.1. Характеристики процесса трогания с начальными параметрами источника: $L = 0,1 \text{ Гн}$; $r = 5 \text{ Ом}$; $U = 220 \text{ В}$

Полезная механическая работа при этом реализуется в виде энергии ударного импульса в конце рабочего хода:

$$dW_c - dQ = dW_{\text{ЭМ}}^I + dA_{\text{МЕХ}}.$$

Если пренебречь противодействием упругой силы сжимаемой пружины и весом якоря как величиной малого порядка по отношению к электромагнитному усилию в рабочем зазоре, то уравнение энергобаланса с учетом произведенного запаса магнитной энергии в предыдущем этапе будет иметь вид

$$\int_{t_2}^{t_3} (ui - i^2 r) dt = \int_{t_2}^{t_3} F_{\text{ЭМ}} V dt + \Delta W_{M(x,i)}, \quad (4.7)$$

где $F_{\text{ЭМ}}$, V - мгновенные значения электромагнитной силы и скорости якоря, $\Delta W_{M(x,i)}$ - приращение энергии магнитного поля за время движения посредством обменной электромагнитной энергии.

В режиме статического индуктивного накопителя магнитной энергии уравнение энергобаланса в процессе движения якоря не имеет внешних отличий от уравнения баланса, когда режим искусственного удержания якоря отсутствует, то есть когда начальный запас магнитной энергии определяется только силами противодействия возвратного механизма. Однако интенсивность процесса энергопреобразования непосредственно зависит от запасенной магнитной энергии (3.9) в системе к началу рабочего хода. Составляющая энергии магнитного поля $\Delta W_{M(x,i)}$ в выражении (4.7) на интервале $t_2 \dots t_3$ в начале движения увеличивает свою интегральную величину, а к концу движения - уменьшает. При этом запас энергии магнитного поля в конце энергопреобразования может быть больше первоначального значения или уменьшится.

В случае уменьшения запаса энергии магнитного поля полезная работа на интервале $t_2 \dots t_3$ осуществляется за счет энергии внешнего источника и энергии, запасенной в магнитном поле. Уравнение энергобаланса (4.7) и элементарного баланса может иметь вид

$$\int_{t_2}^{t_3} (ui - i^2 r) dt + \Delta W_M(x, t) = \int_{t_2}^{t_3} F_{\text{ЭМ}} V dt; \quad dW_{\text{ЭМ}} + dW_{\text{ЭМ}}^I = dA_{\text{МЭХ}}.$$

Количественная оценка исследуемых процессов и соответствующих выводов по использованию данного режима была выполнена при помощи экспериментальных исследований ЛЭМД. В процессе исследований различных типов двигателей изменялись обмоточные данные, напряжение на входе и усилие удержания якоря.

В работах [64; 65; 68; 69] предложена конструкция электромагнитного пресса с ЛЭМД и устройства автономного удержания якоря, реализующая способ нагружения ЛЭМД и дополнительно позволяющая осуществить такие требования, как способность регулировать усилие удержания и обеспечивать релейную характеристику устройства удержания. Это устройство выполнено на основе цилиндрического магнита с внешним притягивающимся якорем. Импульсный ЛЭМД с комбинированным якорем и устройством автономного удержания якоря, входящий в состав, например, электромагнитного пресса, дополнительно содержит устройство питания и управления обмоток устройства удержания и ЛЭМД типа УПУ-3У [71].

Устройство автономного удержания якоря состоит из удерживающего магнита с броневым магнитопроводом и кольцевой полости, в которой размещена либо обмотка, либо постоянный магнит сменного полюсного наконечника и шайбы. Она сочленена с хвостовиком якоря, а удерживающий магнит установлен на станине соосно якорю и взаимодействует своим полюсным наконечником с шайбой. Магнитопровод удерживающего магнита находится во втулке и может перемещаться в осевом направлении, что смягчает удары шайбы о полюсный наконечник при холостом ходе. Полюсный наконечник обеспечивает создание значительной силы сопротивления движению в начале хода при крайне малом сопротивлении движению на остальной части хода, то есть релейность характеристики этого устройства.

Осциллограммы исследуемых режимов ЛЭМД представлены на рис. 4.2 а, б для фиксированного хода якоря $x=30$ мм при изменении усилия удержания. На рис. 4.2 а осциллограммы приведены для ЛЭМД без удержания якоря и на рис. 4.2 б – с удержанием якоря. Обработка осциллограмм при различных режимах работы двигателей позволила получить характерные зависимости (штрих пунктирная линия) для ЛЭМД с автономным удержанием якоря. Более высокие удельные показатели интегрированных ЛЭМД с общим источником МДС объясняются уменьшением его общего веса по сравнению с аналогичными устройствами с автономным удержанием.

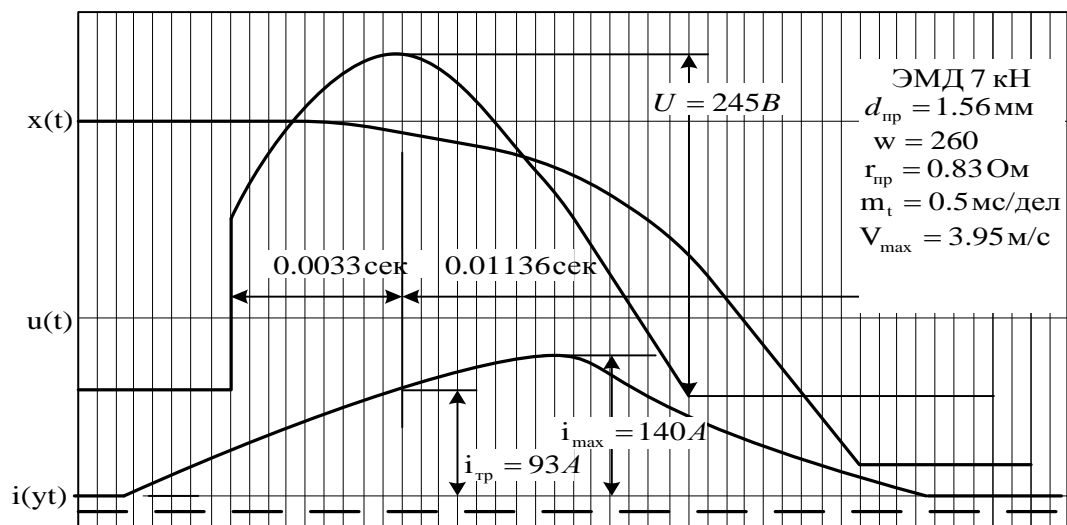
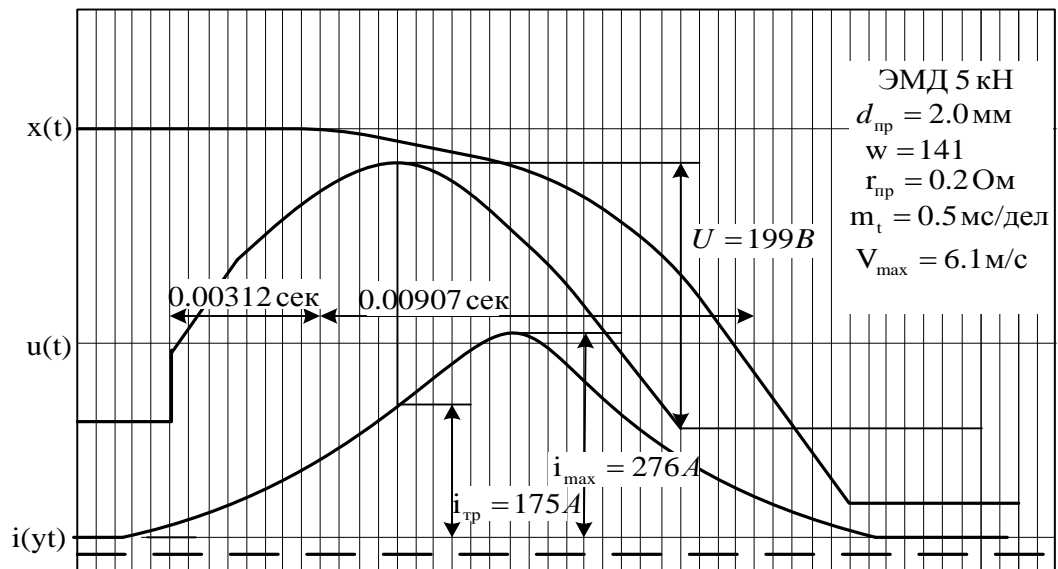
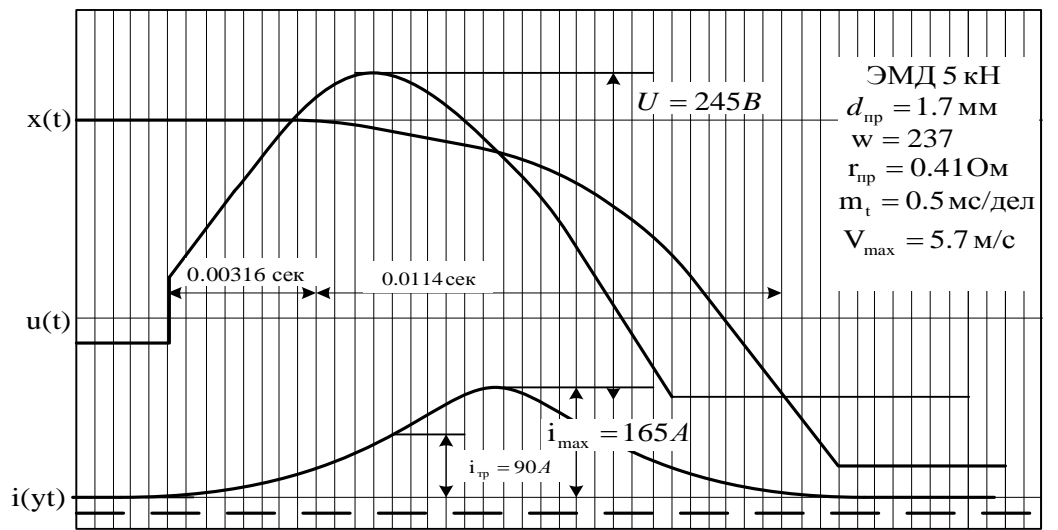


Рис. 4.2 а. Осциллограммы рабочих процессов ЛЭМД без удержания якоря

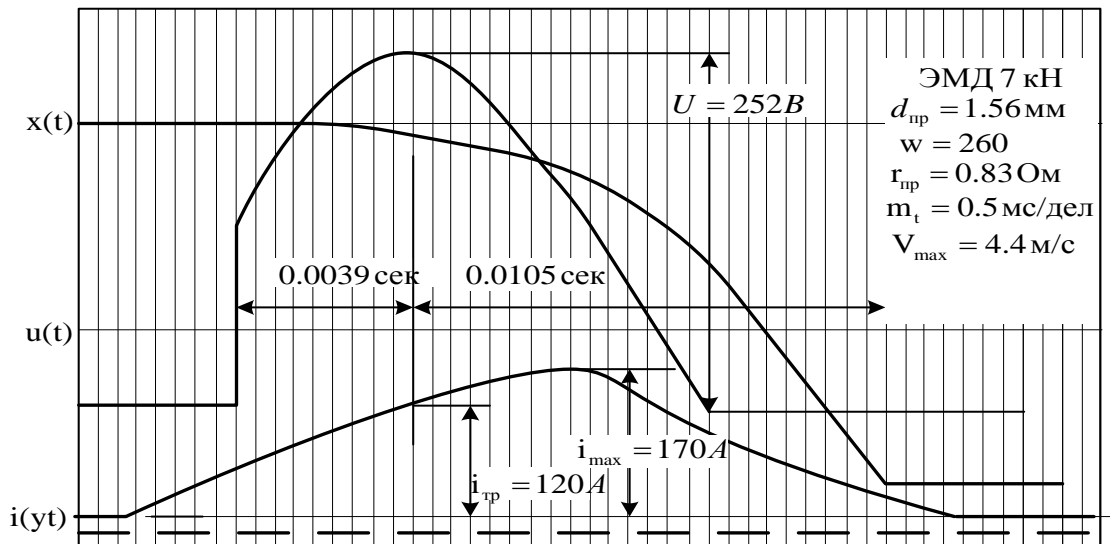
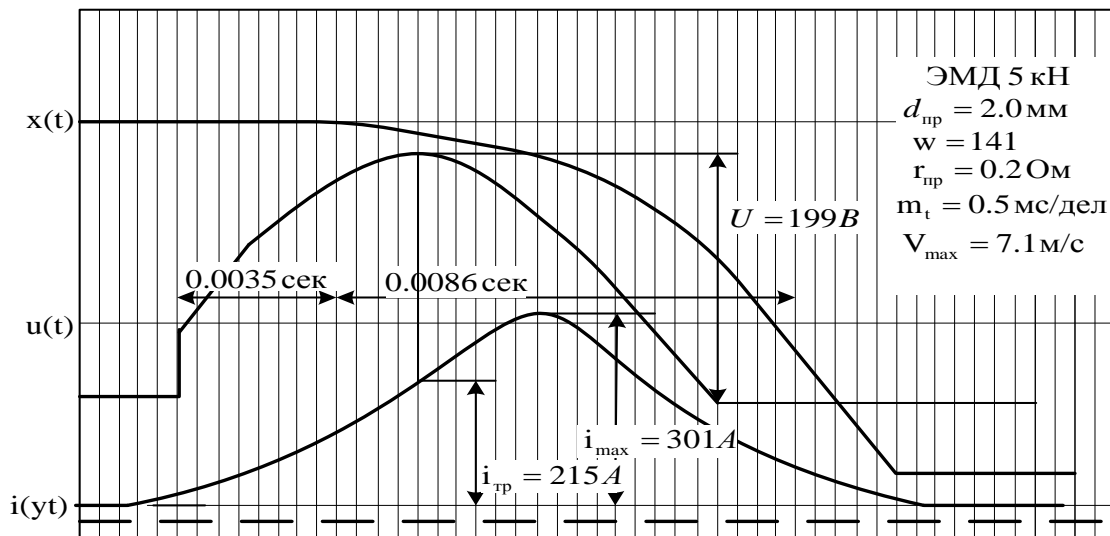
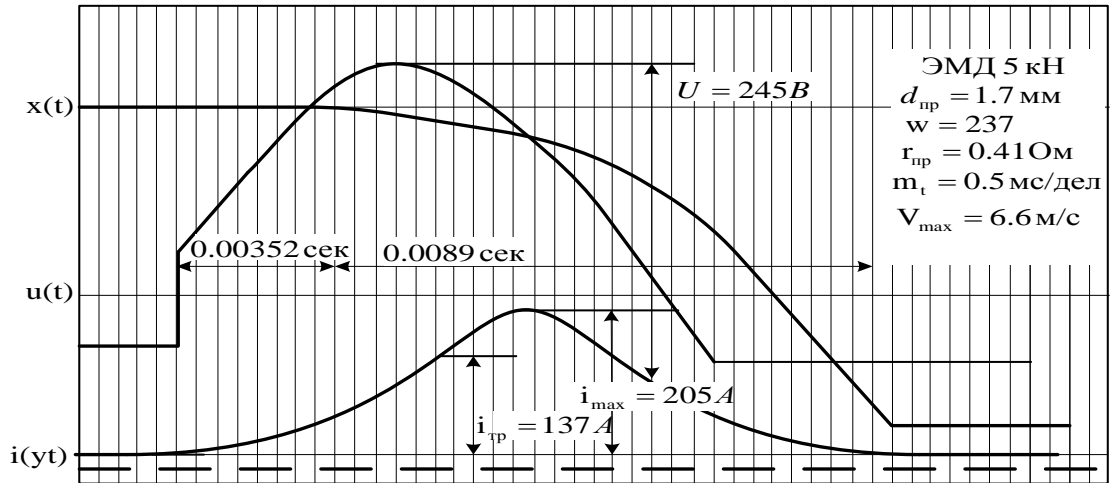


Рис. 4.2 б. Осциллограммы рабочих процессов ЛЭМД с удержанием якоря

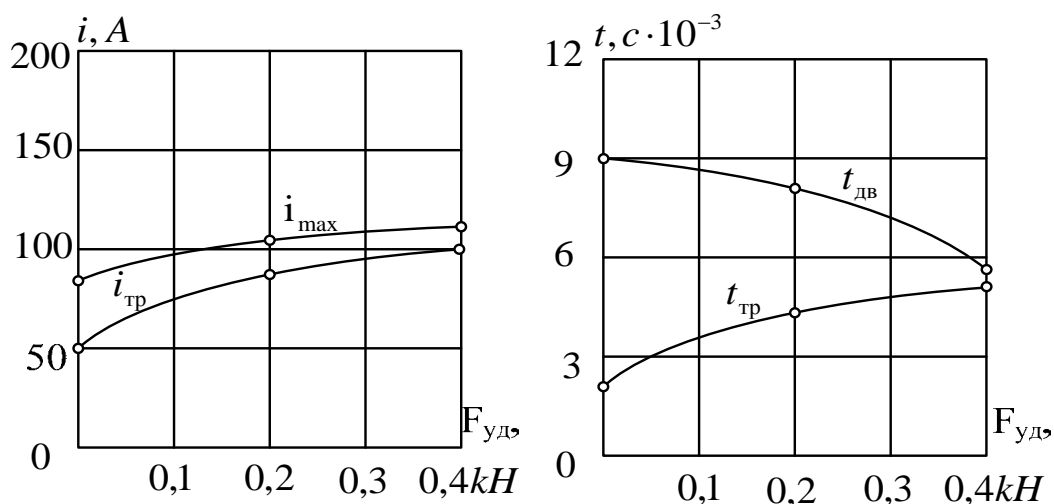


Рис. 4.3. Влияние силы удержания на величину тока $i=f(F_{уд})$

С ростом усилия удержания энергия удара и КПД растут (рис. 4.4 и рис. 4.5). При увеличении усилия удержания до 0,4 кН энергия удара увеличилась почти вдвое по отношению к способу, когда противодействующее усилие определяется только силами естественного сопротивления движению, вызванными механическим трением на этапе трогания.

Диапазон регулирования усилия удержания определяет эффективность запасенной магнитной энергии в магнитном поле двигателя перед началом движения якоря. В соответствии с характеристикой на рис. 4.1 увеличение времени удержания до значения выше $(4...5)\tau$ (τ – электромагнитная постоянная времени двигателя) нецелесообразно, так как процесс накопления магнитной энергии можно считать уже практически завершенным.

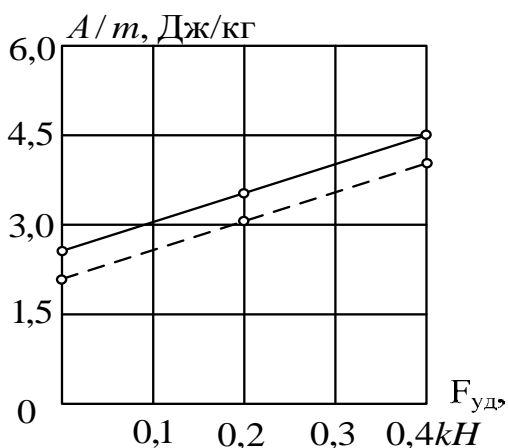


Рис. 4.4. Влияние силы удержания на энергию удара

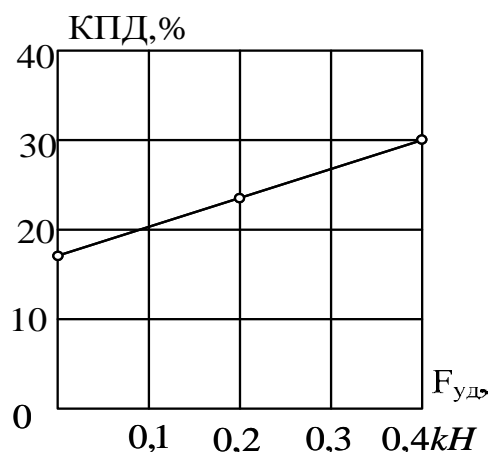


Рис. 4.5. Влияние силы удержания на КПД

В случае $t > 4\tau$ поступающая от источника энергия обеспечивает только поддержание уровня запаса магнитной энергии в системе, преобразуя ее с КПД, близким к 100%, в тепловую энергию. Экспериментально установлено, что

максимальная энергия на выходе и скорость механического движения обеспечиваются только в случае, когда запас магнитной энергии в системе приближен к максимальному, то есть при времени удержания, соответствующем $t \approx 4...5\tau$.

Однако при большем времени удержания эффективность ЛЭМД резко снижается из-за преобладания составляющей энергии, вызванной тепловыми потерями. Это приводит только к повышенному нагреву двигателя и снижению общего КПД энергопреобразования.

Для ЛЭМД с автономным удержанием якоря и ЛЭМД, интегрированных с устройством удержания по схеме с общим магнитопроводом, время процесса накопления магнитной энергии регулируется при помощи внешних управляющих цепей [91; 92; 121; 211]. Здесь вопрос по обоснованию необходимого диапазона усилия удержания не является определяющим. Напротив, для схем ЛЭМД, интегрированных по схеме с общим источником МДС, диапазон усилия удержания определяет режим работы устройства, так как процесс управления осуществляется только механическим путем. При удерживающей силе, превышающей тяговое электромагнитное усилие ЛЭМД, отрыв якоря становится невозможным. При удерживающей силе меньше рациональной эффективности ЛЭМД также падает. Соответственно, выбор диапазона удержания должен осуществляться с учетом тяговых характеристик и эффективности запаса магнитной энергии при неподвижном якоре до момента начала его движения. Таким образом, для ЛЭМД с общим источником МДС выбор диапазона усилия удержания определяет работу двигателя в целом, что обеспечивается временной задержкой движения якоря, не превышающей постоянной времени двигателя в 4...5 раз.

4.2. ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ОДНООБМОТОЧНЫХ ЛЭМД С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ АККУМУЛИРОВАНИЕМ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

При работе ЛЭМД в режиме циклической ударной нагрузки с частотой воздействия более 5 Гц реализация режима статического индуктивного накопителя магнитной энергии ограничена по времени длительностью протекающих процессов. В особенности это относится к импульсным устройствам ударного действия, работа которых синхронизирована с частотой питающей сети или, например, осуществляется в автоколебательном режиме. В этом случае остановка якоря рабочим процессом не предусмотрена.

Анализ процессов энергопреобразования в таких устройствах показывает, что аккумуляция магнитной энергии может быть осуществлена при движущемся якоре в режиме динамического индуктивного накопителя [89; 95; 104; 105].

В однообмоточных ЛЭМД с пружинным возвратом якоря, у которых рабочий ход осуществляется под действием электромагнитных сил единственной системы обмотки, реализация режима форсированного аккумуляирования магнитной энергии может быть осуществлена в цикле в период холостого хода [89]. За основу конструктивной схемы двигателя при этом может быть принят классический броневой ЛЭМД цилиндрического исполнения, без использования для этих целей специальных устройств [104].

Практическая реализация нового рабочего цикла осуществляется при помощи способа управления, который обеспечивает нагружение якоря двигателя противодействующим усилием на этапе движения в период холостого хода, чем обеспечивается интенсивное аккумуляирование магнитной энергии с последующим преобразованием в механическую в период рабочего хода [95]. Величина противодействующего усилия определяется механической энергией возвратного элемента. При этом механическая энергия, полученная возвратным элементом во время рабочего хода якоря в предыдущем цикле, используется в последующем цикле энергопреобразования.

В соответствии с цикличностью повторяющихся процессов по свойственным рабочему циклу динамическим и энергетическим режимам работа ЛЭМД осуществляется в несколько этапов, каждый из которых может быть определен на временном интервале табл. 4.1.

Первый этап энергопреобразования совместим с моментом времени возврата якоря, характеризующийся в электромеханической системе действием упругих сил возвратной пружины и обесточенной обмотке. На данном этапе энергопреобразования на интервале времени $t_1 \dots t_2$ электрическая энергия от источника не поступает ($dW_c = 0$). Потенциальная энергия пружины, запасенная в предыдущем цикле, преобразуется в механическую энергию возврата якоря.

На втором этапе энергопреобразования на интервале $t_2 \dots t_3$ (табл. 4.1) к обмотке ЛЭМД прикладывается напряжение источника. Механическая система характеризуется направлением движения якоря противоположным действию нарастающей электромагнитной силы в рабочем зазоре системы. Потенциальная энергия пружины преобразуется в энергию магнитного поля и аккумуляируется в индуктивностях системы. Начало второго этапа соответствует положению якоря в точке с координатой, соответствующей воздушному зазору $x_{вкл}$.

Рабочий процесс однообмоточного ЛЭМД в режиме динамического аккумулирования электромагнитной энергии

Интервал времени	$t_1 \dots t_2$	$t_2 \dots t_3$	$t_3 \dots t_4$
Режим энергопреобразования			
Условия протекания процесса	$F_{ЭМ} = 0;$ $V < 0;$ $i = 0; x < x_{вкл}$	$F_{ЭМ.хх} < 0; F_{ЭМ.рх} > 0;$ $ F_{ЭМ.хх} > F_{ЭМ.рх};$ $V < 0; x_{рх} > x_{вкл}$	$F_{ЭМ.хх} = 0; F_{ЭМ.рх} > 0;$ $V > 0;$ $i_{хх} = 0;$
Режим работы	—	генераторный	двигательный
Процессы энергопреобразования	—	электрическая } механическая } → → магнитная	электрическая } магнитная } → → механическая

Этап энергопреобразования сопровождается генераторным режимом работы. В указанном режиме энергопреобразования двигатель является по существу динамическим накопителем магнитной энергии, которая преобразуется из поступающей механической и электрической энергии источника.

На этом этапе рабочего цикла, представляющего холостой ход, уравнение баланса элементарных энергий электромеханической системы может быть представлено в следующем виде:

$$dW_C + dA_{МЭХ} - dQ = dW_{ЭМ}^I. \quad (4.8)$$

Механическая работа в данном случае направлена против сил электромагнитного поля. Из (4.8) следует, что потребляемая из сети энергия за вычетом тепловых потерь в меди и механическая энергия внешних сил затрачиваются на изменение энергии магнитного поля.

Выражение процесса динамического аккумулирования магнитной энергии для случая возврата якоря пружиной может быть записано в виде:

$$\int_{t_2}^{t_3} (ui - i^2 r) dt + \int_{X_{\text{ВКЛ}}}^{X_{\text{НОМ}}} F_{\Pi} dx = \int_{t_2}^{t_3} i \frac{d\psi}{dt} dt. \quad (4.9)$$

где F_{Π} - усилие пружины.

Правая часть уравнения (4.9) определяет величину запасаемой системой магнитной энергии к началу рабочего хода якоря. Поскольку рассматривается процесс движения, величина $i \frac{d\psi}{dt}$ представляет мощность электромагнитного поля, а величина $\frac{d\psi}{dt}$ напряжение, компенсирующее ЭДС электромагнитной индукции, характеризующее вихревое электрическое поле [158; 159].

Начало третьего этапа энергопреобразования на интервале $t_3 \dots t_4$ (табл.4.1) характеризуется завершением холостого хода и сменой знака скорости якоря на противоположный. Полезная механическая работа при этом реализуется в виде энергии ударного импульса. Если пренебречь весом якоря как величиной малого порядка по отношению к усилию в рабочем зазоре системы, то при начальных условиях $i_{(t=t_3)} = i_{\text{торг}}$ и $(\frac{d\psi}{dt})_{(t=t_3)} = (\frac{d\psi}{dt})_{(\text{торг.})}$ получим уравнение энергетического баланса в период рабочего хода:

$$\int_{t_3}^{t_4} (ui - i^2 r) dt = \int_{t_3}^{t_4} F_{\text{ЭМ}} V dt + \int_{X=0}^{X_{\text{НОМ}}} F_{\Pi} dx. \quad (4.10)$$

В соответствии с начальными условиями за счет электромагнитной энергии, запасенной в системе в период холостого хода за интервал времени $t_2 \dots t_3$, величина тока трогания якоря и на этапе его движения будет иметь большее значение, чем ток в режиме, когда генераторный режим исключен. Согласно (4.10) электрическая энергия, поступающая из сети в период рабочего хода за время $t_3 \dots t_4$, расходуется на совершение механической работы, увеличение потенциальной энергии возвратной пружины, а также на изменение энергии магнитного поля системы. Как и в случае статического индуктивного накопителя магнитной энергии, выражение баланса (4.10) в период рабочего хода в интегральной и дифференциальной форме может иметь вид:

$$\int_{t_3}^{t_4} (ui - i^2 r) dt + \Delta W_M(x, t) = \int_{t_3}^{t_4} F_{ЭМ} V dt + \int_{X=0}^X F_{П} dx; \quad dW_{ЭМ} + dW_{ЭМ}^I = dA_{МЭХ}.$$

Это означает, что полезная механическая работа может быть выполнена не только за счет энергии, поступившей от источника за время рабочего хода, но и за счет энергии магнитного поля. Значит, энергия магнитного поля на интервале движения уменьшается. Эта особенность энергопреобразовательных процессов в режиме индуктивного накопителя электромагнитной энергии определяет главное их отличие от неуправляемого процесса движения.

На рис. 4.6 приведены динамические характеристики рабочих циклов ЛЭМД при усилии 30 кН, реализующего процесс накопления магнитной энергии на этапе холостого хода якоря с возможным преобразованием ее в механическую энергию на этапе рабочего хода при питании обмотки от источника постоянного напряжения [89].

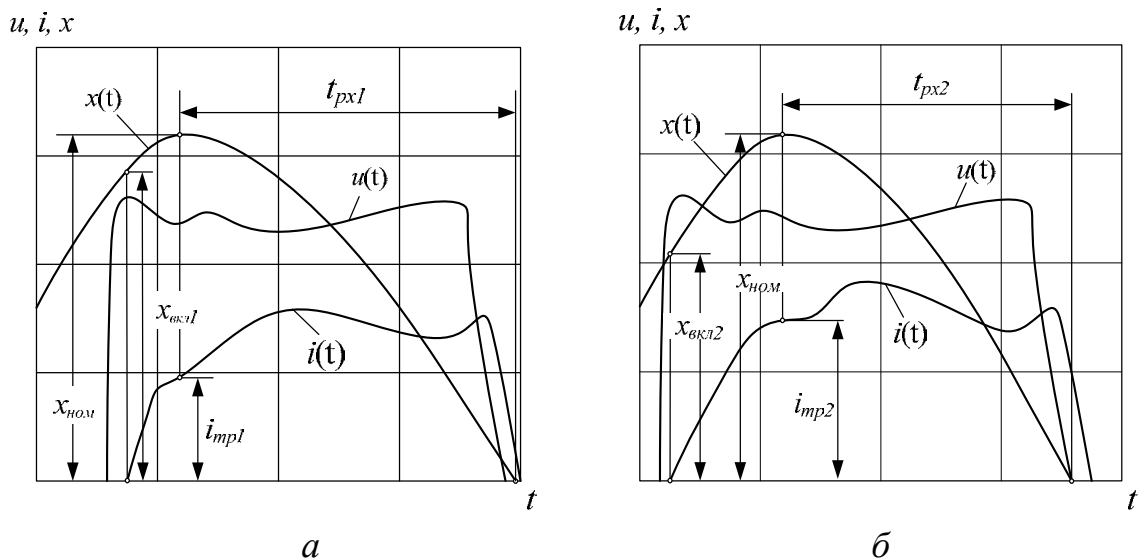


Рис. 4.6. Динамические характеристики рабочих циклов с накоплением магнитной энергии: а – нерациональный; б – рациональный

Работа двигателя осуществлялась в автоколебательном режиме. Начало и окончание импульса тока в обмотке определялось датчиками, фиксирующими положения якоря в период холостого и рабочего хода.

С целью качественного сравнения осциллограммы рабочего процесса приведены для двух режимов. Осциллограмма (рис. 4.6) характеризует рабочий процесс в режиме аккумуляирования магнитной энергии в цикле при относительно невысоком ее начальном запасе. Для сравнения с данным режимом на

рис. 4.6 б приведены осциллограммы процесса в режиме аккумуляции магнитной энергии близком к рациональному.

Сопоставление показывает, что цикл на рис. 4.6 а характеризуется большей продолжительностью рабочего хода $t_{рх1} > t_{рх2}$ и меньшим током трогания $i_{тр1} < i_{тр2}$ при более низком значении амплитудного и среднего значений токов в обмотке за время движения. При одинаковых параметрах питающего обмотку импульса напряжения доля дополнительно аккумуляции магнитной энергии в двигателе определяется начальным значением тока к моменту времени завершения холостого хода.

Сравнение рабочих циклов показывает, что в рациональном цикле обеспечивается существенное увеличение запаса магнитной энергии в системе к началу рабочего хода за счет соответствующего выбора момента подачи импульса тока в обмотку. Это повышает начальную скорость и уменьшает продолжительность рабочих ходов якоря, благодаря чему возрастает энергия ударов и механическая работа.

Отмеченное преобразование механической и электрической энергии в магнитную в режиме динамического индуктивного накопителя магнитной энергии происходит без использования специальных средств регулирования и является наиболее эффективным.

Таким образом, эффективность рассмотренного рабочего цикла, реализующего предварительное накопление магнитной энергии в период холостого хода, выше, чем у цикла, где аккумуляция магнитной энергии отсутствует.

Экспериментально установлено, что режим работы, реализующий динамическое аккумуляцию магнитной энергии в период холостого хода якоря, обеспечил одновременное повышение в 1,24 раза энергии удара, в 1,5 раза ударной мощности и в 1,2 раза – КПД [89].

4.3. ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ДВУХОБМОТОЧНЫХ ЛЭМД ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ С АККУМУЛИРОВАНИЕМ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ В ПЕРИОД ХОЛОСТОГО ХОДА ЯКОРЯ

Рассмотрим реализацию рабочего цикла, обеспечивающего увеличение энергии удара за счет предварительного аккумуляции магнитной энергии посредством обменной электромагнитной энергии в процессе движения якоря в двухобмоточных ЛЭМД двойного действия, у которых рабочий и холостой ход осуществляется под действием электромагнитных сил. Особенности исполнения конструктивных схем таких ЛЭМД рассматриваются в [96].

В отличие от однообмоточных ЛЭМД с пружинным возвратом якоря, в которых отношение усилия в процессе движения к массе якоря составляет де-

сять и более раз, в двухобмоточных ЛЭМД двойного действия в ряде случаев усилие в рабочих зазорах сравнимо с весом якоря.

Сущность предлагаемого рабочего цикла заключается в следующем. При возврате якоря под действием электромагнитного усилия обмотки холостого хода до момента времени, когда якорь займет исходное положение, на обмотку рабочего хода подают напряжение, под действием которого в цепи протекает ток, величина которого к моменту начала рабочего хода следующего цикла успевает достичь максимального значения, чем обеспечивается повышение предударной скорости и, соответственно, энергии удара.

Практическая реализация рабочего цикла осуществляется при помощи способа управления, который обеспечивает нагружение якоря двигателя противодействующим усилием на этапе движения в период холостого хода, чем обеспечивается интенсивное аккумулирование электромагнитной энергии с последующим ее преобразованием в механическую в период рабочего хода. Работа двухобмоточного электромагнитного двигателя характеризуется идентично повторяющимися процессами, образующими законченный цикл. По свойственным рабочему циклу динамическим и энергетическим режимам работа ЛЭМД осуществляется в три этапа, каждый из которых может быть представлен интервалом времени (табл. 4.2).

На рис. 3.14 приведены процессы энергопреобразования, рассмотренные в плоскости координат «потокосцепление – ток» и качественно поясняющие возможные динамические режимы работы.

Первый этап энергопреобразования на интервале времени $t_1 \dots t_2$ (табл. 4.2) характеризуется протеканием тока по обмотке холостого хода (хх). Якорь под действием электромагнитной силы совершает холостой ход в направлении, противоположном рабочему ходу.

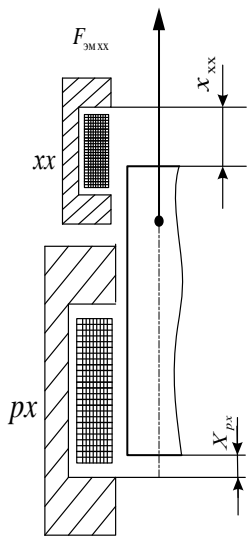
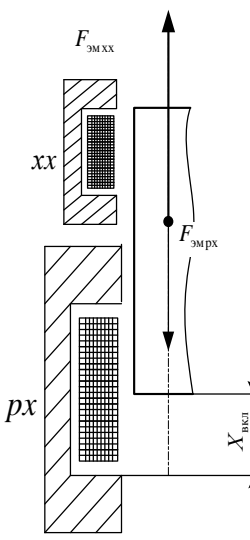
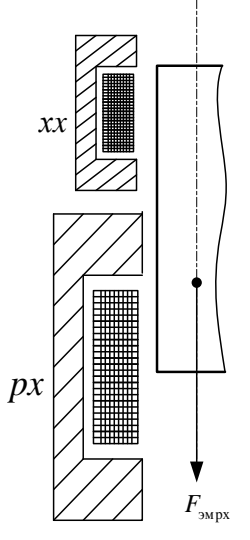
Согласно закону сохранения энергии для обмотки холостого хода уравнение баланса элементарных энергий может быть представлено в виде:

$$dW_C^{(X)} - dQ^{(X)} = dW_{ЭМ}^{I(X)} + dA_{МЕХ}^{(X)} . \quad (4.11)$$

Из (4.11) следует, что потребляемая из сети энергия (dW_C), за вычетом потерь в меди обмотки холостого хода (dQ), затрачивается на изменение энергии магнитного поля ($dW_{ЭМ}^I$) и создание механической работы ($dA_{МЕХ}$) по перемещению массы якоря.

Таблица 4.2

Процессы энергопреобразования ЛЭМД двойного действия в режиме динамического индуктивного накопителя магнитной энергии

Интервал времени		$t_1 \dots t_2$	$t_2 \dots t_3$	$t_3 \dots t_4$
Режим энергопреобразования				
		$F_{эм,xx} < 0; F_{эм,px} = 0;$ $V < 0;$ $i_{px} = 0; x_{px} < x_{вкл}$	$F_{эм,xx} < 0; F_{эм,px} > 0;$ $ F_{эм,xx} > F_{эм,px} ;$ $V < 0; x_{px} > x_{вкл}$	$F_{эм,xx} = 0; F_{эм,px} > 0;$ $V > 0;$ $i_{xx} = 0;$
Режим работы обмотки	xx	двигательный	двигательный	—
	px	—	генераторный	двигательный
Процессы энергопреобразования обмотки	xx	электрическая → → магнитная → → механическая	электрическая → → магнитная → → механическая	—
	px	—	электрическая } → механическая } магнитная →	электрическая } → механическая } магнитная →

В соответствии с (4.11) на интервале время движения якоря имеет вид:

$$\int_{t_1}^{t_2} (u_{xx} i_{xx} - i_{xx}^2 r_{xx}) dt = \int_{t_1}^{t_2} F_{эм,xx} V dt + \Delta W_M(x, t), \quad (4.12)$$

где $u_{xx}, i_{xx}, r_{xx}, F_{ЭМХХ}, V$ - соответственно напряжение, ток, сопротивление, электромагнитное усилие, скорость якоря для обмотки холостого хода.

Электрическая энергия, поступающая из сети, расходуется на совершение механической работы по подъему массы, пропорциональной площади S_{oab} , и изменение энергии магнитного поля, определяемой как разность площадей S_{obe} и S_{oad} , а также тепловые потери в обмотке. Используя подход, аналогичный [127; 71], представим указанные выше площади в виде элементарных и комбинированных магнитных циклов (рис. 4.7 а).

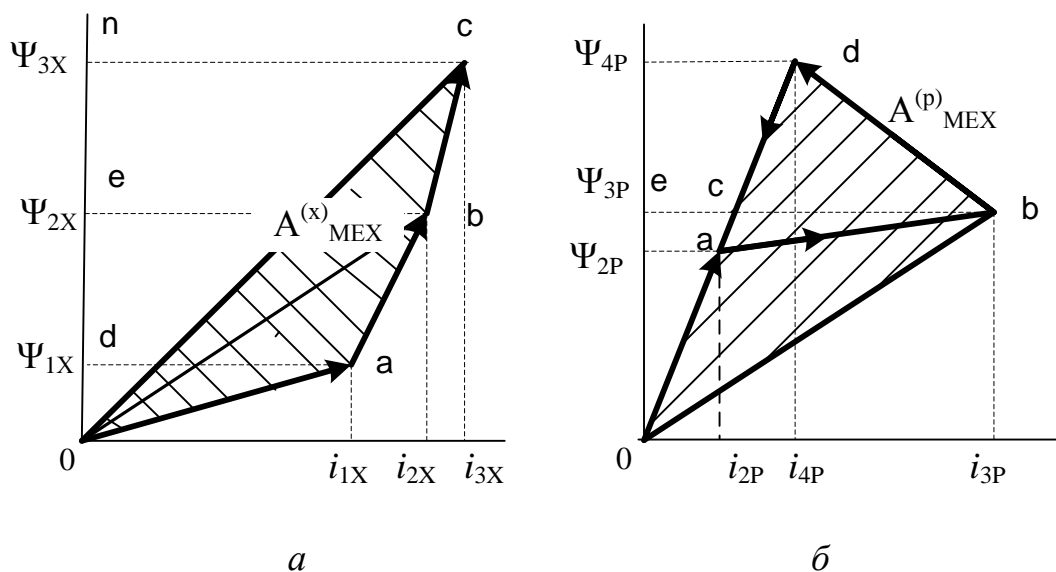


Рис. 4.7 Магнитные циклы ЛЭМД двойного действия: а – обмотки холостого хода; б – обмотки рабочего хода

Второй этап энергопреобразования на интервале времени $t_2 \dots t_3$ (табл. 4.2) характеризуется одновременным протеканием тока по обмотке холостого (xx) и рабочего хода (px). Начало этапа соответствует положению якоря, когда значение воздушного зазора $x_{вкл}$. Режим энергопреобразования сопровождается более интенсивным потреблением электрической энергии обмоткой холостого хода, при этом компенсируются затраты механической энергии по перемещению якоря против сил, разворачивающегося магнитного поля в воздушном зазоре обмотки рабочего хода. Направление движения якоря сохраняется, противодействующее усилие возрастает. Движение якоря осуществляется в сторону увеличения воздушного зазора обмотки рабочего хода. Механическая энергия, затраченная противодействующего усилия в обмотке рабочего хода, преобразуется в магнитную (площадь S_{oab} на рис. 4.7 б), и, соответственно, магнитная энергия, запасаемая в воздушном зазоре рабочей обмотки к началу рабочего хода, преобразованная из механической и электрической энергии, пропорциональна площади S_{obc} (рис. 4.7 б).

На этой стадии рабочего цикла, представляющего холостой ход, уравнение баланса элементарных энергий рабочей обмотки имеет вид:

$$dW_C^{(P)} + dA_{\text{МЭХ}}^{(P)} - dQ^{(P)} = dW_{\text{ЭМ}}^{I(P)}. \quad (4.13)$$

В соответствии с (4.13) энергия, потребляемая из сети (dW_C), за вычетом потерь в меди обмотки рабочего хода (dQ), и механическая энергия, направленная против сил магнитного поля ($dA_{\text{МЭХ}}$), преобразуются в электромагнитную энергию ($dW_{\text{ЭМ}}^I$).

Согласно (4.8) баланс энергий за время движения якоря на интервале времени $t_2 \dots t_3$ имеет вид

$$\int_{t_3}^{t_2} (u_{\text{рх}} i_{\text{рх}} - i_{\text{рх}}^2 r_{\text{рх}}) dt + \int_{t_2}^{t_3} F_{\text{ЭМрх}} V dt = \int_{\Psi_{2\text{рх}}}^{\Psi_{3\text{рх}}} i_{\text{рх}} \frac{d\psi_{\text{рх}}}{dt} dt, \quad (4.14)$$

где $u_{\text{рх}}$, $i_{\text{рх}}$, $\Psi_{\text{рх}}$, $r_{\text{рх}}$, $F_{\text{ЭМрх}}$ соответственно напряжение, ток, потокосцепление, сопротивление, электромагнитное усилие в воздушном зазоре обмотки рабочего хода.

Правая часть уравнения (4.14) определяет величину магнитной энергии, запасаемой системой, и зависит от момента времени подачи импульса напряжения на обмотку рабочего хода в период возврата якоря и положения якоря, соответствующего воздушному зазору $x_{\text{вкл}}$.

Работа двигателя осуществляется в режиме динамического аккумулирования магнитной энергии, которая преобразуется из поступающей механической и электрической энергии. В соответствии с режимом для обмотки холостого хода электрическая энергия, поступающая из сети за время движения якоря, преобразуется в электромагнитную энергию, пропорциональную площади $S_{\text{ебсн}}$ (рис. 4.7 а), часть из которой расходуется на совершение механической работы (площадь $S_{\text{обс}}$), компенсируя этим противодействующее усилие обмотки рабочего хода. Уравнение баланса элементарных энергий и полного баланса системы за время движения якоря аналогично выражениям (4.13) и (4.14).

Для обмотки рабочего хода режим энергопреобразования является генераторным режимом (табл. 4.2, интервал $t_2 \dots t_3$). Электрическая энергия, поступающая из сети, и механическая энергия внешних сил преобразуются через обменную электромагнитную энергию в магнитную, запасаемую в поле системы для использования на следующем этапе энергопреобразования. Величина магнитной энергии, аккумулированная в поле системы к началу третьего этапа энергопреобразования, пропорциональна площади $S_{\text{обс}}$ (рис. 4.7 б).

Момент времени остановки якоря и смены знака скорости на противоположный определяет начало третьего этапа энергопреобразования (табл. 4.2, интервал $t_3 \dots t_4$). Обмотка холостого хода обесточивается, а якорь под действием

электромагнитного усилия обмотки рабочего хода и потенциальной энергии массы якоря, приобретенной при подъеме его на высоту x_{px} , совершает ускоренное перемещение.

Уравнение баланса элементарных энергий и полного баланса энергий, в соответствии с циклом (рис. 4.7 б), на интервале времени $t_3...t_4$ рабочего хода якоря может быть представлено в виде:

$$dW_C^{(P)} - dQ^{(P)} = dA_{MEX}^{(P)} + dW_{ЭМ}^{I(P)},$$

$$\int_{t_3}^{t_2} (u_{px} i_{px} - i_{px}^2 r_{px}) dt + m_{я} g x = \int_{t_3}^{t_4} F_{ЭМ px} V dt + \Delta W_M(x, t). \quad (4.15)$$

Согласно (4.15) потенциальная энергия, запасенная системой в период холостого хода за интервал времени $t_1...t_3$, и электрическая энергия, поступающая из сети в период рабочего хода за время $t_3...t_4$, расходуются на совершение механической работы и изменение энергии магнитного поля. Далее цикл повторяется.

Реализованная за полный рабочий цикл механическая энергия рабочей обмотки соответствует площади S_{obd} (рис. 3.4 б), а механическая энергия обмотки холостого хода соответствует площади S_{oabc} (рис. 3.4 а).

Анализ зависимостей (4.11...4.15) показывает, что полный рабочий цикл представляет многократное преобразование электромагнитной и магнитной энергии. В период холостого хода электрическая энергия источника частично преобразуется в электромагнитную, запасаемую в магнитном поле, и механическую при одновременном преобразовании механической энергии в электромагнитную, запасаемую системой для реализации на следующем этапе энергопреобразования в механическую работу по перемещению якоря в период рабочего хода. Таким образом, при работе двигателя происходит непрерывный энергообмен между электромагнитной и механической энергией через обменную электромагнитную между обмотками холостого и рабочего хода.

По сравнению с рабочим циклом однообмоточного ЛЭМД, когда возврат якоря осуществляется при помощи пружины, предлагаемый цикл (табл. 4.2) будет характеризоваться относительно низким значением КПД вследствие более высоких потерь в обмотке холостого хода. К достоинствам рабочего цикла следует отнести возможность автоматического регулирования во всем диапазоне перемещения якоря, что немаловажно, например, при переменной характеристике нагрузки объекта, на который воздействует якорь своей массой.

4.4. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В РЕЖИМЕ АККУМУЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД

Практическая реализация форсированного аккумуляирования электромагнитной энергии в индуктивностях за время рабочего цикла состоит в искусственном нагружении якоря двигателя противодействующим усилием. Увеличение противодействующего усилия в линейных электромагнитных двигателях позволяет улучшить их энергетические характеристики. В ЛЭМД обычного исполнения, используемых в приводе ударных устройств, по мере перемещения якоря противодействующее усилие создается возвратной пружиной, работающей на сжатие. Максимальное значение противодействующего усилия обычно рассчитывается с учетом времени, обеспечивающего гарантированный возврат якоря, и, как правило, оно на несколько порядков меньше электромагнитного усилия, создаваемого двигателем в номинальном режиме. Это обуславливает сравнительно небольшое значение тока трогания по отношению к току в установившемся процессе и увеличивает время движения.

При включении двигателя в электрической и магнитной цепях происходят переходные процессы, которые значительно усложняются при движении якоря в изменяющемся магнитном поле. От момента подачи на обмотку напряжения и до момента окончания движения якоря работа двигателя определяется двумя основными этапами - этапом трогания и этапом движения. Продолжительность этапов трогания и движения характеризуется временем трогания $i_{тр}$ и временем движения $i_{дв}$.

По мере увеличения противодействующего усилия время трогания и ток трогания возрастают, а время движения сокращается.

Анализ рабочих процессов ЛЭМД с пружинным возвратом якоря показывает возможность некоторого повышения динамической эффективности работы двигателя за счет увеличения его быстродействия и повышения механической энергии на выходе путем изменения противодействующего усилия [10].

Существование некоторого оптимального значения противодействующей силы можно объяснить тем, что при ее снижении до значения ниже оптимального ток трогания уменьшается настолько, что в начальный период движения требуется большее время для нарастания тока до значения, при котором не только преодолевается противодействующая сила, но и сообщается кинетическая энергия якорю двигателя. При этом несмотря на увеличение времени движения после снижения противодействующей силы и выхода ее за пределы оптимального значения время срабатывания всегда монотонно убывает [82; 83].

Одним из эффективных способов форсировки силовых электромагнитных двигателей является интенсификация рабочих процессов в режиме аккумуляирования электромагнитной энергии в собственной системе индуктивностей за время рабочего цикла [81].

Практическая реализация форсированного аккумулярования электромагнитной энергии в индуктивностях за время рабочего цикла состоит в искусственном нагружении якоря двигателя противодействующим усилием. Опытная проверка на физических моделях показала, что увеличение противодействующего усилия на этапе трогания в линейных электромагнитных двигателях позволяет улучшить их удельные силовые и энергетические характеристики.

Нами было исследовано влияние начального противодействующего усилия на энергетические и динамические показатели импульсных ЛЭМД для различных магнитных циклов [101]. Для выявления влияния этого усилия на некоторые энергетические и временные характеристики импульсных ЛЭМД рассмотрим уравнения баланса сил, действующих на якорь. В период трогания, когда подвижная система находится в состоянии покоя, уравнение баланса сил описывается системой уравнений при $t=t_1$:

$$F_{\text{эм}}(x) - F_{\text{п}}(x) = 0;$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = 0.$$

После начала движения уравнение баланса сил описывается уравнением:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{\text{эм}}(x) - F_{\text{п}}(x), \quad (4.17)$$

где m – масса якоря; x – текущая координата перемещения;

$F_{\text{эм}}(x), F_{\text{п}}(x)$ – соответственно, электромагнитная и противодействующая силы.

Механическую работу двигателя за время движения якоря можно определить из энергобаланса [167]:

$$A = \int dW_{\text{эм}} - \int dW_{\text{эм}}^I = \Delta W_{\text{эм}} - W_{\text{эм}}^I.$$

Если известны начальное значение тока и потокосцепления в момент трогания (i_1, ψ_1) и значения этих же величин в момент окончания движения (i_2, ψ_2), то для линейной магнитной системы

$$d\psi = \frac{\psi_2 - \psi_1}{i_2 - i_1} di \quad \text{и} \quad \Delta W_{\text{эм}} = \int_{i_1}^{i_2} i d\psi = \int_{i_1}^{i_2} \frac{\psi_2 - \psi_1}{i_2 - i_1} i di = \frac{1}{2} (\psi_2 - \psi_1) (i_2 - i_1).$$

При этом $\Delta W_{\text{эм}}^I$ определяется приращением энергии магнитного поля:

$$\Delta W_{\text{эм}}^I = \Delta W_{\text{эм}} = \frac{\psi_2 i_2}{2} - \frac{\psi_1 i_1}{2}.$$

В результате интегральная механическая работа за время движения представляется в виде площади магнитного цикла [71]:

$$A = \frac{1}{2}(i_1\psi_2 - i_2\psi_1). \quad (4.18)$$

Подчеркнем, что указанным способом можно определять только интегральную работу за полное время движения, то есть когда начальные и конечные точки движения характеризуются неподвижным состоянием. При определении работы, совершаемой в течение произвольного интервала времени динамического процесса, подобный подход не применим, так как в этом случае $\Delta W_{\text{эм}}^I \neq \Delta W_{\text{эм}}$.

В процессе движения ЛЭМД преодолевает противодействующее усилие $F_{\Pi}(x)$. При начальном положении якоря тяговое усилие, развиваемое двигателем, возрастает с ростом тока его обмотки. Ток, при котором тяговая сила $F_{\text{эм}}(x)$ становится равной противодействующей $F_{\Pi}(x)$ (это вызывает начало движения якоря), соответствует току трогания. Значение тока трогания является только параметром механической системы, осуществляющей противодействие. При токе, меньшем тока трогания, якорь не приходит в движение и работа осуществляется на упор.

Представим ток и потокосцепление в момент трогания в виде [101; 167]:

$$i_1 = \sqrt{2F_0x_1 / L_1}, \quad (4.19)$$

$$\psi_1 = \sqrt{2F_0x_1L_1}, \quad (4.20)$$

где L_1 - начальная индуктивность, соответствующая начальному рабочему воздушному зазору x_1 ; F_0 - сила сопротивления движению якоря в момент трогания.

Положим, что сила противодействия изменяется следующим образом:

$$F_{\Pi} = \begin{cases} F_0 & \text{при } t \leq t_0 \text{ и } x = x_1 \\ F_{\Pi} & \text{при } t \geq t_0 \text{ и } x \leq x_1. \end{cases} \quad (4.21)$$

Умножая (4.17) на dx с учетом (4.21), получим уравнение энергетического баланса

$$\int_{V_1}^{V_2} mVdV = \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{эм}}(x)dx - \int_{x_1}^{x_2} F_{\Pi}(x)dx, \quad (4.22)$$

где V_1, V_2 - начальная и конечная скорость движения якоря.

Первый член правой части (4.22) определяет полезную механическую работу (работоспособность), которая может быть совершена при полном согласовании тяговой характеристики с характеристикой противодействующей силы, и равен площади, ограниченной этой характеристикой на интервале перемещения $x_1...x_2$ и осью абсцисс, при определенном значении тока:

$$\int_{x_1}^{x_1} F_{\text{эм}}(x) dx = \frac{1}{2} (i_1 \psi_2 - i_2 \psi_1). \quad (4.23)$$

Допустим, что перемещение якоря происходит при постоянном токе, тогда при постоянном напряжении питающей сети этот режим будет осуществляться, если сила сопротивления движению будет почти равна движущей силе. В этом случае под электромагнитной силой $F_{\text{эм}}(x)$ понимается статическая сила $F_{\text{ст}}(x)$. Это движущая сила, приблизительно равная статической силе тяги, а кинетическая энергия якоря в конце хода будет равна нулю.

Тогда уравнение (4.22) примет вид:

$$\int_{x_1}^{x_1} F_{\text{ст}}(x) dx = \int_{x_1}^{x_1} F_{\Pi}(x) dx. \quad (4.24)$$

В этом случае вся энергия магнитного поля превращается в механическую работу и идет на преодоление силы сопротивления движению. Из (4.24) следует, что чем больше сила $F_{\Pi}(x)$, тем должна быть больше сила $F_{\text{ст}}(x)$.

Если равенство (4.24) не выполняется, то к концу хода якорь приобретает некоторую скорость V_2 . При этом движущая сила будет равна некоторой динамической силе тяги. В этом случае выражение (4.22) для интегрирования левой части можно представить в виде:

$$\frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} = \int_{x_1}^{x_1} F_{\text{эм дин}}(x) dx - \int_{x_1}^{x_1} F_{\Pi}(x) dx.$$

Согласно начальному условию ($V_1 = 0$) получим:

$$\frac{mV_2^2}{2} = \int_{x_1}^{x_1} F_{\text{эм дин}}(x) dx - \int_{x_1}^{x_1} F_{\Pi}(x) dx. \quad (4.25)$$

После замены первого члена правой части (4.25) согласно (4.23) и в результате дальнейших преобразований с учетом (4.19) и (4.20) получим

$$\frac{mV_2^2}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{2F_0 x_1} \left(\psi_2 \sqrt{\frac{1}{L_1}} - i_2 \sqrt{L_1} \right) - \int_{x_1}^{x_1} F_{\Pi}(x) dx. \quad (4.26)$$

Для цикла $i = \text{const}$: $i_1 = i_2$, $\psi_2 = L_2 i_2 = L_2 i_1$, и выражение (4.26) примет вид:

$$\frac{mV_2^2}{2} = F_0 x_1 (k_m - 1) - \int_{x_1}^{x_1} F_{\Pi}(x) dx, \quad (4.27)$$

где $k_m = \frac{L_2}{L_1}$ - кратность изменения индуктивности [71; 101; 167].

Первый член правой части (4.27) определяет работу электромагнитных сил, совершаемую при переходе якоря из начального положения в конечное. Эта работа затрачивается на преодоление силы сопротивления движению и накопление кинетической энергии. Если принять, что на участке движения якоря от x_1 до x_2 усилие $F_n(x) = 0$, то вся работа электромагнитных сил идет на сообщение якорю кинетической энергии:

$$\int_{x_2}^{x_1} F_{\text{ЭМ ДИН}}(x) dx = \frac{mv^2}{2} = F_0 x_1 (k_m - 1) . \quad (4.28)$$

Из (4.23), (4.27) и (4.28) видно: чем больше сила сопротивления движению якоря F_0 в момент трогания, тем больше площадь переходной динамической характеристики магнитного цикла, пропорциональная интегральной работе. Следовательно, больше будет энергия, сосредоточенная в объеме машины.

Увеличение энергии в конце процесса энергопреобразования связано с увеличением тока трогания и энергии, накопленной в магнитном поле к моменту трогания. Однако при движении якоря сила сопротивления $F_n(x)$ должна быть минимальной, иначе согласно (4.27) энергия удара будет уменьшаться.

Из (4.28) можно определить конечную скорость якоря:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2F_0 x_1 (k_m - 1)}{m}} . \quad (4.29)$$

Считая движение якоря равноускоренным, время его движения можно определить как [167]:

$$t_{\text{дв}} = \frac{x_1 - x_2}{V_2} = x_1^{1/2} / \sqrt{2F_0 x_1 (k_m - 1) / m} . \quad (4.30)$$

Из выражения (4.30) следует, что при увеличении удерживающего усилия F_0 в момент трогания якоря время движения его уменьшается, что при той же величине хода обуславливает большую конечную скорость V_2 и большую кинетическую энергию, развиваемую ЛЭМД. Выражения (4.28...4.30) показывает, что удерживающее усилие влияет на процессы, происходящие в ЛЭМД не только на этапе трогания, но и движения.

Графики нормированной скорости $V_2^* = \frac{V_2}{V_{2\max}}$ и время движения

$t_{\text{дв}}^* = 1 - \frac{t_{\text{дв}}}{t_{\text{дв max}}}$ при изменении удерживающего усилия приведены на рис. 4.8,

здесь полагаем: $F_{0\max} = F_0|_{i=i_{\text{уст}}}$; $t_{\text{дв max}} = t_{\text{дв}}|_{F_0 \rightarrow 0}$.

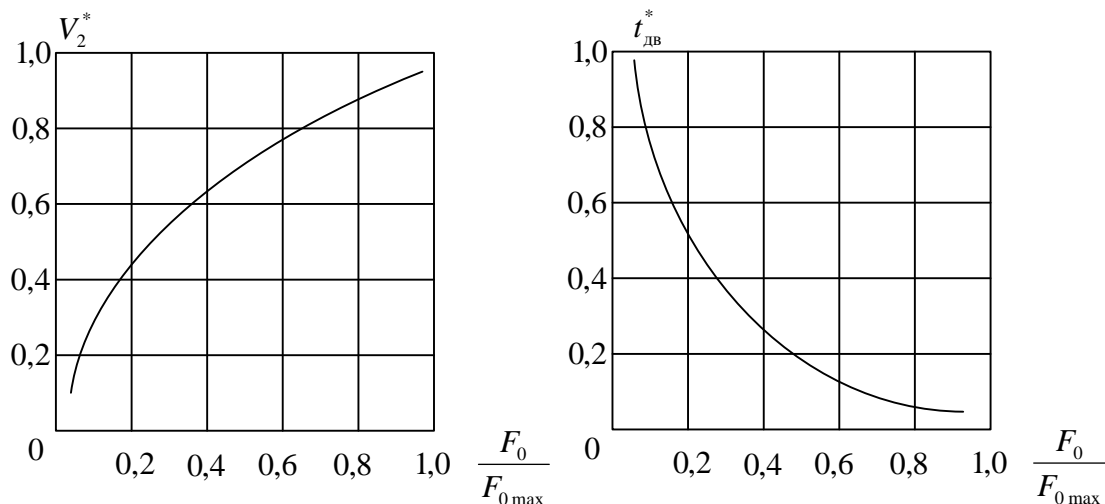


Рис. 4.8. Графики нормированной скорости и времени движения

Сравним эффективность способов форсировки в режиме статического индуктивного накопителя электромагнитной энергии и при питании от источника повышенного напряжения. В основе технической реализации способа форсировки от источника повышенного напряжения лежит, как правило, идея использования емкостных накопителей энергии.

Для определённости, при выводе необходимых соотношений, будем считать, что двигатель в сравниваемых способах форсировки имеет одинаковую конфигурацию магнитной цепи, линейные размеры и массу подвижных частей. Примем также, что величины начального воздушного зазора, начальной индуктивности и сопротивления катушек одинаковы. Сравнение будем осуществлять по фиксированному значению начального тягового усилия, которое характеризуется единым равенством для обеих схем форсировки:

$$F_3(x) = F_0 = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{L_1}{x_1}. \quad (4.31)$$

Из (4.31) видно, что величина начального тягового усилия определяется противодействующим усилием. При малейшем превышении тягового усилия над противодействующим двигатель приводится в движение. Ввиду идентичности схем сравниваемых ЛЭМД начальное усилие является только функцией тока. Поэтому дальнейшее сравнение целесообразно выполнить относительно начальных значений токов, обеспечивающих необходимое превышение тягового усилия над противодействующим.

Рассматривая двигатель на границе области трогания, когда его подвижная система находится еще в состоянии покоя, при первом способе форсировки напряжением имеем:

$$i = \frac{U_{\phi}}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{L_1} t_1} \right), \quad (4.32)$$

где U_{ϕ} – изменяемое по величине напряжение, приложенное к катушке; r – активное сопротивление катушки.

Как видно из выражения (4.32), при постоянстве противодействующей силы значение тока трогания i_1 будет зависеть только от величины приложенного напряжения.

Во втором способе форсировки за счет искусственного удержания якоря в режиме аккумуляирования магнитной энергии получаем при $t \rightarrow \infty$:

$$i_1 = \frac{U}{r}. \quad (4.33)$$

В данном случае процесс трогания якоря осуществляется при номинальном значении напряжения и установившемся токе. Данное значение тока трогания может быть достигнуто и при первом способе форсировки, но при напряжении, превышающем номинальное. При условии равенства получаемых токов в сравниваемых способах форсировки, приравнявая (4.32) и (4.33), получим:

$$\frac{U_{\phi}}{U} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{r}{L} t_1}}. \quad (4.34)$$

Соотношение (4.34) устанавливает равноценность условий работы в сравниваемых схемах форсировки по начальному усилию за счет превышения напряжения источника по отношению к режиму с аккумуляированием магнитной энергии, когда движение якоря осуществляется при установившемся значении тока катушки и номинальном напряжении.

В (4.34) отношение $\frac{U_{\phi}}{U} = K_U$ определяет коэффициент кратности по напряжению. Переходя к безразмерным величинам и нормируя время трогания к электромагнитной постоянной времени двигателя $t^* = t_1/\tau$, получим:

$$K_U^* = \frac{1}{1 - e^{-t^*}}.$$

График нормированного коэффициента кратности сравниваемых способов представлен на рис. 4.9.

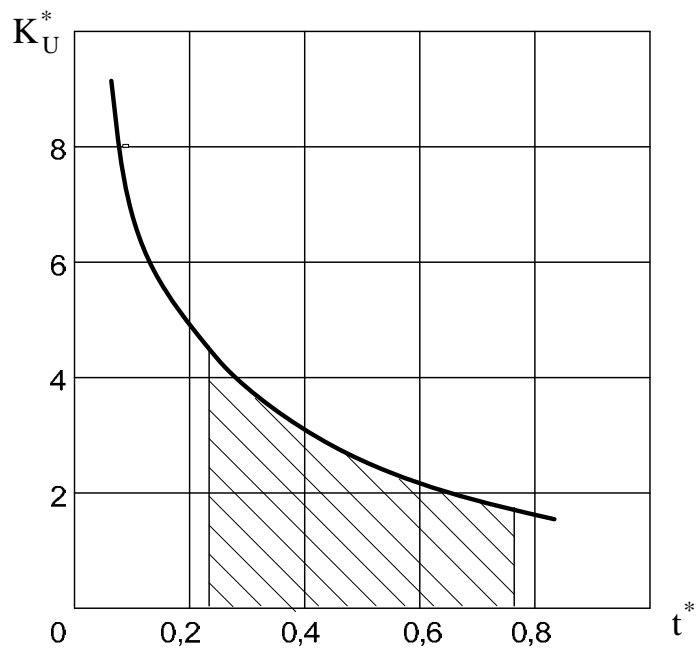


Рис. 4.9. График нормированного коэффициента кратности по напряжению

Полученные соотношение (4.34) и график на рис. 4.9 указывают на преимущество использования способа форсировки с аккумулярованием электромагнитной энергии в рабочем цикле по отношению к способу форсировки напряжением, для осуществления которого необходим источник питания с повышенным напряжением. На практике это означает, что в диапазоне изменения постоянной времени реальных электромеханических устройств (заштрихованная область на рис. 4.9) возникает необходимость 2...5-кратного повышения питающего напряжения по отношению к номинальному для получения сравнимого эффекта. Такое повышение напряжения даже на короткое время во многих случаях просто недопустимо.

5. ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ЛЭМД

5.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЭМД

Исследование рабочих характеристик ЛЭМД целесообразно провести с помощью полевого метода. Это позволяет без существенных допущений, упрощающих решение задачи, получить достаточно точные характеристики электромагнитного поля, учитывающие геометрию двигателя, движение его конструктивных элементов, влияние вихревых токов и насыщение магнитной системы. По полученным характеристикам электромагнитного поля могут быть рассчитаны силы, действующие на якорь, что дает возможность определять смещение якоря в каждый момент времени. Кроме траектории перемещения якоря, по полученным характеристикам электромагнитного поля в каждый момент времени можно вычислять величину тока в обмотке, потребляемую и полезную мощности, тепловые и магнитные потери. Моделирование электромагнитного поля в конструкции ЛЭМД выполнено методом конечных элементов (МКЭ).

На рис. 5.1 показан общий вид рассеченной пополам конструкции ЛЭМД.

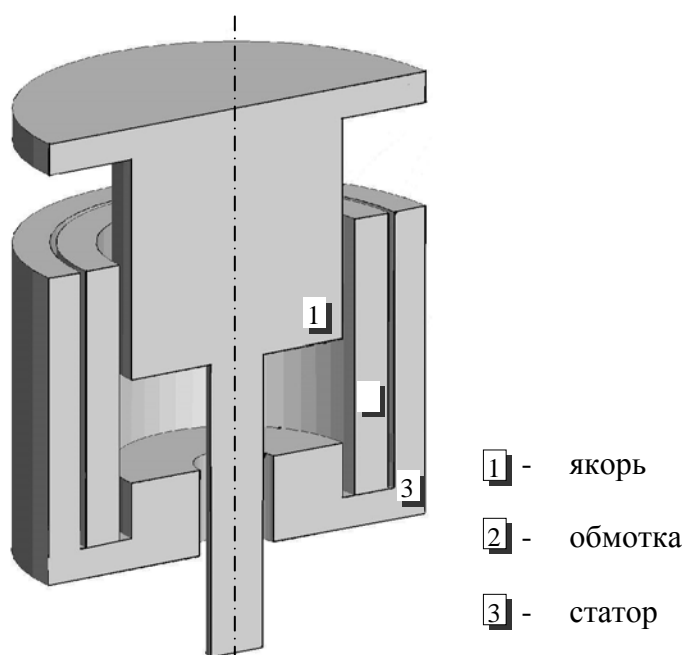


Рис. 5.1. Общий вид сечения расчетной конструкции ЛЭМД с нетрадиционной формой элементов активной зоны

Расчет и анализ электромагнитных процессов и рабочих характеристик ЛЭМД выполнен для устройства, состоящего из цельнометаллического цилиндрического статора, цилиндрического якоря, катушки возбуждения (обмотки), намотанной медным проводом, и возвратной пружины с жесткостью, обеспечивающей гарантированный возврат якоря после завершения рабочего цикла. Статор считается жестко закрепленным на станине, якорь перемещается вдоль координаты z .

Работа устройства заключается в следующем. В исходном состоянии якорь благодаря действию возвратной пружины находится в верхнем положении. При подаче импульса напряжения на катушку якорь под действием электромагнитных сил перемещается вниз и наносит удар. После завершения рабочего хода якорь под действием сил возвратной пружины возвращается в исходное положение. При этом напряжение с катушки может быть снято раньше, чем закончится рабочий ход. Рассматривается также режим, при котором начальное перемещение якоря осуществляется только при определенном значении тока.

Кроме формы напряжения, исходными для процедуры моделирования данными являются также характерные параметры конструктивных элементов двигателей, такие, как радиус и длина якоря, радиус штока (части якоря, которая наносит удар), внутренний и внешний радиус статора, радиус отверстия в статоре для движения штока, высота катушки возбуждения, величина рабочего воздушного зазора, а также высота диска (верхняя часть якоря), высота стопа и высота полюса (нижняя часть статора). Должны быть заданы также характеристики обмотки, а именно количество витков, сопротивление, площадь сечения и длина провода. Кроме того, необходимо знать характеристики стали, из которой изготовлены якорь и статор (удельное сопротивление и кривая намагничивания), и жесткость возвратной пружины.

Для приведенных исходных данных вычисляются следующие зависящие от времени характеристики ЛЭМД: траектория перемещения якоря, изменение тока в обмотке, действующие на якорь силы, потребляемая от источника мощность, полезная механическая мощность, мощность тепловых и магнитных потерь, а также время рабочего процесса (время, по истечении которого произойдет удар) и скорость в момент удара.

Считая токи смещения пренебрежимо малыми, для описания электромагнитного поля в рассматриваемой конструкции воспользуемся уравнением:

$$\operatorname{rot} \frac{\vec{B}}{\mu(B)} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (5.1)$$

где \vec{E} - вектор напряженности электрического поля, \vec{B} — вектор индукции магнитного поля, σ - удельная электрическая проводимость, μ - магнитная проницаемость, в общем случае зависящая от модуля вектора магнитной индукции:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}.$$

Введем векторный потенциал \vec{A} такой, что $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$. Тогда уравнение (5.1) преобразуется к виду:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu(B)} \operatorname{rot} \vec{A} = \sigma \cdot \vec{E}. \quad (5.2)$$

Конструкция ЛЭМД является осесимметричной, и поэтому уравнение (5.2) удобней решать в цилиндрических координатах (r, z) . В этих координатах расчетная область Ω включает в себя половину вертикального сечения конструкции. Левая граница Ω является осью симметрии конструкции, а остальные три ее границы должны быть удалены настолько, чтобы изучаемое электромагнитное поле на них было пренебрежимо мало.

Учитывая вид конструкции, будем считать, что ток, векторный потенциал и напряженность электрического поля имеют только одну ненулевую φ -компоненту, зависящую от координат r и z . Тогда вместо векторного уравнения (4.2) получаем скалярное уравнение:

$$-\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu(B)} \operatorname{grad} A_{\varphi}\right) + \frac{A_{\varphi}}{\mu(B)r^2} - \frac{A_{\varphi}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu(B)}\right) = \sigma \cdot E_{\varphi}. \quad (5.3)$$

На внешней границе Γ , включающей ось симметрии и три удаленные границы расчетной области Ω , будем считать потенциал A_{φ} равным нулю. Расчетную область Ω можно разбить на три подобласти: Ω_1 - подобласть обмотки, Ω_2 - подобласть якоря и статора, Ω_3 - подобласть воздушного пространства.

Поскольку в обмотке напряженность электрического поля определяется подведенным к концам ее провода напряжением $U(t)$ и изменяющимся во времени магнитным потоком, она может быть представлена в виде:

$$E_{\varphi} = \left(-\frac{\partial A_{\varphi}}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right), \quad (5.4)$$

где V - некоторая скалярная функция (скалярный электрический потенциал). Определим напряжённость E_{φ} в подобласти Ω_1 . Проинтегрируем по всему объему провода обмотки уравнение (5.4), считая, что провод имеет длину l и сечение S_{np} (площадью $|S_{np}|$):

$$\int_0^l \int_{S_{np}} E_{\varphi} dS dl = \int_0^l \int_{S_{np}} \left(-\frac{\partial A_{\varphi}}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) dS dl. \quad (5.5)$$

Учитывая, что V - скалярный электрический потенциал, получим:

$$\int_0^l \int_{S_{np}} \frac{\partial V}{\partial \varphi} dS dl = U(t) |S_{np}|. \quad (5.6)$$

Из закона сохранения тока и того, что проводимость провода постоянна по всей его длине, получаем:

$$\int_{S_{np}} E_{\varphi} dS = const.$$

Будем считать, что напряженность электрического поля E_{φ} во всем объеме провода обмотки постоянна (поскольку возможные отклонения E_{φ} по сечению провода от своего среднего по проводу значения практически не влияют на создаваемое электромагнитное поле вокруг обмотки), то есть

$$\int_0^l \int_{S_{np}} E_{\varphi} dS dl = E_{\varphi} l |S_{np}|.$$

Тогда из уравнения (5.5) с учетом (5.6) и того, что компонента A_{φ} векторного потенциала постоянна по φ , получаем формулу для вычисления напряженности электрического поля в обмотке:

$$E_{\varphi} = \frac{2\pi}{l |S_{np}|} \int_{z_1}^{z_2} \int_{R_1}^{R_2} \left(- \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial t} \right) r dr dz + \frac{U(t)}{l}, \quad (5.7)$$

где точки (R_1, Z_1) и (R_2, Z_2) характеризуют положение сечения обмотки в расчетной области Ω .

Таким образом, в подобласти Ω_1 напряженность электрического поля выражается формулой (5.7). При этом удельная электрическая проводимость σ в Ω_1 равна удельной электрической проводимости провода обмотки σ_{np} , магнитная проницаемость μ равна магнитной проницаемости вакуума μ_0 . В якоре и статоре (подобласть Ω_2) напряженность электрического поля определяется только изменяющимся во времени магнитным полем (поток) и поэтому может быть представлена в виде:

$$E_{\varphi} = - \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial t}. \quad (5.8)$$

При этом в Ω_2 удельная электрическая проводимость $\sigma = \sigma_{ст}$ (где $\sigma_{ст}$ - удельная электрическая проводимость стали, из которой изготовлены якорь и статор), магнитная проницаемость $\mu = \mu(B)$ (где $\mu(B)$ - кривая намагничивания, соответствующая магнитным свойствам стали якоря и статора). В общем случае и кривые намагничивания, и значения удельной электрической проводимости для якоря и статора могут быть разными. В подобласти Ω_3 , соответствующей воздушному пространству, удельная проводимость $\sigma = 0$, магнитная проницаемость $\mu = \mu_0$.

Таким образом, с учетом (5.3), (5.7) и (5.8) электромагнитное поле в рассматриваемой конструкции ЛЭМД полностью описывается следующей нелинейной начально-краевой задачей:

$$-div\left(\frac{1}{\mu(B)} grad A_\varphi\right) + \frac{A_\varphi}{\mu(B)r^2} - \frac{A_\varphi}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\mu(B)}\right) = \sigma E_\varphi;$$

$$A_\varphi|_\Gamma = 0, \quad A_\varphi|_{t=0} = 0;$$

в области Ω_1 :

$$E_\varphi = -\frac{2\pi}{l|S_{np}|} \int_{z_1}^{z_2} \int_{R_1}^{R_2} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\partial t}\right) r dr dz + \frac{U(t)}{l}, \quad (5.9)$$

$$\sigma = \sigma_{np}, \quad \mu = \mu_0;$$

в области Ω_2 : $E_\varphi = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial t}$, $\sigma = \sigma_{ст}$, $\mu = \mu(\vec{B})$;

в области Ω_3 : $\sigma = 0$, $\mu = \mu_0$.

По найденным из решения задачи (5.9) значениям A_φ можно вычислить компоненты вектора магнитной индукции и напряженности электрического поля:

$$B_r = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}, \quad B_z = \left(\frac{\partial A_\varphi}{\partial r} + \frac{A_\varphi}{r}\right),$$

$$E_\varphi = \frac{2\pi}{l|S_{np}|} \int_{z_1}^{z_2} \int_{R_1}^{R_2} \left(-\frac{\partial A_\varphi}{\partial t}\right) r dr dz + \frac{U(t)}{l} \quad (\text{в области } \Omega_1),$$

$$E_\varphi = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial t} \quad (\text{в области } \Omega_2). \quad (5.10)$$

По найденным из (5.10) значениям компонент вектора индукции магнитного поля и напряженности электрического поля можно рассчитать силу, действующую на якорь, токи, протекающие в обмотке, и вихревые токи, наводимые в якоре и статоре. Это в свою очередь даст возможность определить траекторию движения якоря, время, через которое произойдет удар, скорость в момент удара, потребляемую и полезную мощность, магнитные потери, а также тепловые потери в обмотке, якоре и статоре.

Таким образом, нелинейная начально-краевая задача (5.9) и соотношения (5.10) полностью описывают электромагнитное поле в конструкции ЛЭМД и, следовательно, позволяют моделировать весь процесс его работы, учитывая вихревые токи в якоре и статоре, а также зависимость магнитной проницаемости от значений магнитной индукции.

Для решения поставленной задачи (4.9) будем использовать метод ко-

нечных элементов. Сначала получим эквивалентную вариационную формулировку в форме Галеркина.

Умножим обе части уравнения (5.9) на пробную функцию θ , которая принимает нулевое значение на границах расчетной области Ω , и, интегрируя полученное равенство по Ω , получим:

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \operatorname{div} \left(\frac{1}{\mu(B)} \operatorname{grad} A_{\varphi} \right) \Theta d\Omega + \int_{\Omega} \frac{1}{\mu(B)r^2} A_{\varphi} \Theta d\Omega - \\ & - \int_{\Omega} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu(B)} \right) A_{\varphi} \Theta d\Omega = \int_{\Omega} \sigma E_{\varphi} \Theta d\Omega. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Применяя к первому слагаемому в левой части уравнения (5.1) формулу Грина (интегрирования по частям) и учитывая, что Θ на границах Ω обращается в нуль, получим:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \frac{1}{\mu(B)} \operatorname{grad} A_{\varphi} \operatorname{grad} \Theta d\Omega + \int_{\Omega} \frac{1}{\mu(B)r^2} A_{\varphi} \Theta d\Omega - \\ & - \int_{\Omega} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu(B)} \right) A_{\varphi} \Theta d\Omega = \int_{\Omega} \sigma E_{\varphi} \Theta d\Omega. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Конечноэлементная аппроксимация

Так как расчетная область Ω в цилиндрической системе координат содержит только прямоугольные подобласти, то для ее дискретизации будем использовать преимущественно прямоугольные конечные элементы. К тому же выбор прямоугольных элементов обеспечивает более простое построение вычислительной схемы для подобластей с $\mu = \mu(\vec{B})$ и высокую точность получаемого решения. Поскольку в процессе моделирования якорь должен смещаться, в зонах стыковки подвижной и неподвижной частей конструкции прямоугольная сетка становится несогласованной. Поэтому выделим две подобласти «сшивки», внутри которых на каждом шаге смещения якоря будет перестраиваться ряд треугольников, согласованных с соседними прямоугольными элементами. На рис. 5.2 приведены фрагменты сеток для двух наиболее характерных положений якоря в процессе одного расчета. Введем базисные функции, номера которых совпадают с номерами узлов сетки. Каждая базисная функция Θ_j равна единице в узле с номером j , нулю в остальных узлах и является билинейной функцией координат r и z на прямоугольниках и линейной на треугольниках, содержащих j -й узел. Будем считать, что на каждом конечном элементе

$\mu = \mu(\vec{B})$ является константой и определяется по среднему значению B на элементе.

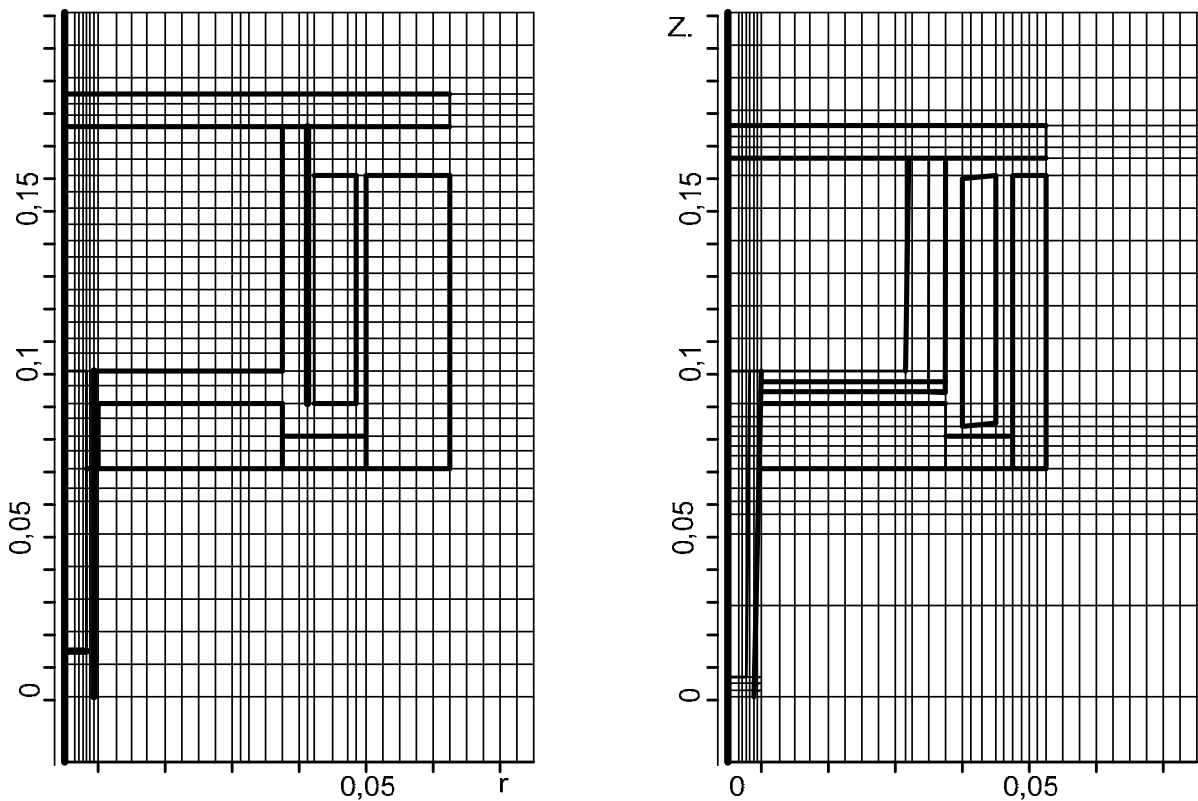


Рис. 5.2. Конечноэлементная смешанная сетка для различных положений якоря в процессе расчета при t счета, равном: а) $t = 0,01$ с; б) $t = 0,012$ с

Рассмотрим третье слагаемое левой части вариационного уравнения (5.12). Данное слагаемое представляет собой объемный интеграл, содержащий поверхностную δ -функцию, а поскольку на границах некоторых конечных элементов $\mu(\vec{B})$ терпит разрыв, $\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu(B)} \right)$ - это производная от разрывной функции. Используя доказательство, приведенное в работе [257], из уравнения (5.12) получаем:

$$\int_{\Omega} \frac{1}{\mu(B)} \text{grad} A_{\varphi} \text{grad} \Theta d\Omega + \int_{\Omega} \frac{1}{\mu(B)} r^2 A_{\varphi} \Theta d\Omega - \int_{\Gamma_{\mu}} \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\mu(B)} \right] n_r A_{\varphi} \Theta dS = \int_{\Omega} J_{\varphi} \Theta d\Omega. \quad (5.13)$$

В выражении (5.13) n_r - r -компонента единичного вектора нормали к границе Γ_μ , $\left[\frac{1}{\mu(B)} \right]$ - скачок $\frac{1}{\mu(B)}$ на границе Γ_μ , который вычисляется в направлении от начала выбранного вектора нормали к его концу, а под Γ_μ понимается объединение всех вертикальных границ, на которых μ терпит разрыв. Это, например, вертикальные границы якоря или статора с воздушным зазором, а также вертикальные границы между конечными элементами внутри якоря или статора с разными значениями коэффициента μ .

Будем искать решение A_φ в виде разложения по базисным функциям Θ_j :

$$A_\varphi = \sum_{j=1}^n q_j \Theta_j, \quad (5.14)$$

где n - количество узлов в сетке, q_j - коэффициенты разложения.

Подставляя (5.14) в (5.13) и заменяя поочередно пробную функцию Θ на базисные функции Θ_j , получим систему алгебраических уравнений, i -я строка которой выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \left[\int_{\Omega} \frac{1}{\mu(B)} \text{grad} \Theta_i \text{grad} \Theta_j d\Omega + \int_{\Omega} \frac{1}{\mu(B) r^2} \Theta_i \Theta_j d\Omega - \right. \\ \left. - \int_{\Gamma_\mu} \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\mu(B)} \right] n_r \Theta_i \Theta_j d\Omega \right] q_j = \int_{\Omega} J_\varphi \Theta_i d\Omega. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Рассмотрим подробнее интеграл, стоящий в правой части уравнения (5.15). Из выражений (5.7) и (5.8) видно, что E_φ является функцией $\frac{\partial A_\varphi}{\partial t}$.

Выполним аппроксимацию по времени с помощью трехслойной неявной схемы [268]. Будем считать, что t_k - текущий временной слой (на котором ищется значение A_φ), а t_{k-1} и t_{k-2} - два предыдущих значения из сетки по времени.

Тогда

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \sigma E_\varphi \Theta_i d\Omega = \int_{\Omega_1} \sigma_{np} \left\{ \frac{2\pi}{l |S_{np}|} \sum_{j=1}^n \left(-\xi \cdot \int_{Z_1}^{Z_2} \int_{R_1}^{R_2} \Theta_j r dr dz \right) \right\} \Theta_j d\Omega + \\ + \int_{\Omega_1} \sigma_{np} \frac{U(t)}{l} \Theta_i d\Omega + \sum_{j=1}^n -\xi \cdot \int_{\Omega_2} \sigma_{cm} \Theta_i \Theta_j d\Omega, \end{aligned} \quad (5.16)$$

где $\xi = (q_j \alpha_0 - q_j^{k-1} \alpha_1 + q_j^{k-2} \alpha_2)$, компоненты q_j^{k-1}, q_j^{k-2} - коэффициенты разложения A_φ по базису $[\Theta_j]$ на двух предыдущих временных слоях, q_j - коэффициенты разложения A_φ на текущем (k -м) временном слое, а коэффициенты $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ определяются соотношениями:

$$\alpha_0 = \frac{\Delta t + \Delta t_0}{\Delta t \cdot \Delta t_0}, \quad \alpha_1 = \frac{\Delta t}{\Delta t_1 \cdot \Delta t_0}, \quad \alpha_2 = \frac{\Delta t_0}{\Delta t_1 \cdot \Delta t_1},$$

$$\Delta t = t_k - t_{k-2}, \quad \Delta t_0 = t_k - t_{k-1}, \quad \Delta t_1 = t_k - 1 - t_{k-2}. \quad (5.17)$$

При расчете A_φ на втором временном слое может быть использована двухслойная полностью неявная схема, а начальное значение A_φ , то есть значение A_φ на первом временном слое принимается равным нулю.

Таким образом, значение весов q_j в разложении A_φ по базисным функциям Θ_j может быть найдено из решения системы нелинейных алгебраических уравнений:

$$A(\vec{q})\vec{q} = \vec{F}, \quad (5.18)$$

где элементы матрицы A и вектора F определяются соотношениями:

$$A_{ij} = \int_{\Omega} \frac{1}{\mu(B)} \text{grad} \Theta_i \text{grad} \Theta_j d\Omega + \int_{\Omega} \frac{1}{\mu(B)r^2} \Theta_i \Theta_j d\Omega - \int_{\Gamma_\mu} \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\mu(B)} \right] n_r \Theta_i \Theta_j d\Gamma + \sigma_{np} \frac{2\pi}{l|S_{np}|} \alpha_0 S_j \int_{\Omega_2} \Theta_i \Theta_j d\Omega; \quad (5.19)$$

$$F_i = \sigma_{np} \frac{2\pi}{l|S_{np}|} \sum_{j=1}^n ((\alpha_1 q_j^{k-1} - \alpha_2 q_j^{k-2}) S_j) \cdot \int_{\Omega_1} \Theta_i d\Omega + \sigma_{cm} \sum_{j=1}^n \left\{ (\alpha_1 q_j^{k-1} - \alpha_2 q_j^{k-2}) \int_{\Omega_2} \Theta_i \Theta_j d\Omega \right\}. \quad (5.20)$$

В выражениях (5.19) и (5.20) коэффициенты S_j при использовании кусочно-билинейных базисных функций вычисляются следующим образом:

$$S_j = \int_{Z_1 R_1}^{Z_2 R_2} \int \Theta_j r dr dz = \frac{1}{4} (h_{z_j}^v + h_{z_j}^n) (h_{r_j}^l + h_{r_j}^p) (r_j - h_{r_j}^l + h_{r_j}^p), \quad (5.21)$$

где $h_{r_j}^l$ и $h_{r_j}^p$ - шаги сетки по координате r соответственно слева и справа от узла с номером j , а $h_{z_j}^v$ и $h_{z_j}^n$ - шаги сетки по координате z соответственно сверху и снизу от j -го узла.

Отметим, что формулы для вычисления интегралов в элементах матрицы A и вектора F приводятся в работе [260].

Особенностью полученной системы (5.18) является то, что она нелинейная. Нелинейность задачи вызвана тем, что в процессе работы ЛЭМД его магнитопровод размагничивается, то есть коэффициент μ начинает меняться в зависимости от величины индукции B . Необходимо отметить, что решение задачи с допущением, что коэффициент μ в магнитопроводе является константой, то есть нелинейность не учитывается, приводит к результату, который очень далек от реальности.

Для решения нелинейной задачи (5.18) применялся метод Ньютона, который основан на линеаризации нелинейной конечноэлементной системы с помощью разложения в ряд Тейлора [258; 259].

После линеаризации полученная система алгебраических уравнений решалась методом сопряженных градиентов с предобуславливанием неполным разложением Холесского [261].

Расчет основных параметров и характеристик ЛЭМД

В рассматриваемой конструкции ЛЭМД на его якорь в каждый момент времени будут действовать три силы:

$F^M(t)$ – сила, порождаемая изменением магнитного поля в якоре;

$F^Y(t)$ – сила упругости возвратной пружины, действующая на подвешенный к ней якорь;

$F^A(t)$ – сила Ампера, порождаемая взаимодействием магнитного поля с вихревыми токами в якоре.

Приведем выражения для расчета z -составляющей каждой из этих сил. Силу $F^M(t)$ можно разделить на две составляющие: объемную $F_z^{MV}(t)$ и поверхностную $F_z^{MS}(t)$. Сила $F_z^{MV}(t)$ определяется формулой [262]:

$$F_z^{MV}(t) = \int_{\Omega_{\text{я}}} \frac{1}{2} \frac{\mu(B(t)) - \mu_0}{\mu(B(t))\mu_0} \frac{dB^2(t)}{dz} d\Omega, \quad (5.22)$$

где $\Omega_{\text{я}}$ - подобласть расчетной области Ω , соответствующая якорю. Выражение для силы $F_z^{MS}(t)$ может быть получено из формулы (5.22) с учетом разрыва касательной составляющей вектора индукции \vec{B} на границе между магнитопроводом (железом) и воздухом:

$$F_z^{MS}(t) = \alpha \int_S \frac{1}{2} \left(\frac{\mu(B(t))}{\mu_0} - 1 \right)^2 \left(\frac{B_r(t)}{\mu(B(t))} \right)^2 \mu_0 dS, \quad (5.23)$$

где S - объединение горизонтальных границ между якорем и воздушным зазором, $\alpha = 1$ на нижних границах и $\alpha = -1$ на верхних границах якоря.

Силу упругости можно вычислить, зная коэффициент жесткости пружины k и расстояние $Z(t)$, на которое уже переместился якорь к текущему моменту времени t :

$$F_z^Y(t) = -kZ(t). \quad (5.24)$$

Сила упругости является тормозящей, то есть направленной против движения якоря при действующем электромагнитном поле.

Сила Ампера, действующая на проводящий якорь, также является тормозящей. С учетом того, что вектор плотности тока в якорю имеет только j -составляющую, она может быть вычислена следующим образом:

$$F_z^A(t) = \int_{\Omega_{\text{я}}} \sigma_{\text{ст}} \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial t} B_r d\Omega. \quad (5.25)$$

Отметим, что значения компонент вектора магнитной индукции \vec{B} в узлах сетки могут быть вычислены по формулам (5.10) с помощью найденных в результате решения системы алгебраических уравнений (5.18) значений q_j (значений потенциала A_{φ} в узлах сетки). Таким образом, результирующая сила, действующая на якорь в момент времени t , равна:

$$F_z(t) = F_z^{MV}(t) + F_z^{MS}(t) + F_z^Y(t) + F_z^A(t). \quad (5.26)$$

Скорость $V(t)$ движения якоря в каждый момент времени может быть определена в результате решения следующего обыкновенного дифференциального уравнения 1-го порядка:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{F_z(t)}{m}, \quad (5.27)$$

где m - масса якоря. При этом в начальный момент времени $V(t)|_{t=0} = 0$.

По значениям скорости можно определить положение $Z(t)$, которое примет якорь в момент времени t :

$$\frac{dZ(t)}{dt} = V(t). \quad (5.28)$$

Функции $Z(t)$ и $V(t)$ полностью описывают весь процесс движения якоря ЛЭМД.

Полезная мощность P_{Π} определяется соотношением:

$$P_{\Pi}(t) = P_{\text{вх}}(t) - P_{\text{T}}(t) - P_{\text{M}}(t), \quad (5.29)$$

где $P_{\Pi}(t)$ - потребляемая мощность, $P_{\text{T}}(t)$ - тепловые потери в катушке и железе, $P_{\text{M}}(t)$ - магнитные потери.

Покажем, как с помощью рассчитанных нами характеристик (значений A_{φ} и \vec{B} во всем объеме ЛЭМД) в любой момент времени определить составляющие правой части соотношения (5.29).

Как известно, потребляемая мощность равна величине тока в обмотке, умноженного на напряжение. Поэтому, с учетом формулы (5.7), определяющей напряженность электрического поля в обмотке, получаем:

$$P_{\text{ex}}(t) = U(t)\sigma_{np} \cdot |S_{np}| \cdot \left[-\frac{2\pi}{l|S_{np}|} \int_{Z_1}^{Z_2} \int_{R_1}^{R_2} \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial t} r dr dz + \frac{U(t)}{l} \right]. \quad (5.30)$$

Тепловые потери в обмотке, якоре и статоре с учетом формул (5.10) могут быть определены следующим образом:

$$P_m(t) = \int_{\Omega} \sigma E^2 d\Omega = \sigma_{np} \cdot \left[-\frac{2\pi}{l|S_{np}|} \int_{Z_1}^{Z_2} \int_{R_1}^{R_2} \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial t} r dr dz + \frac{U(t)}{l} \right]^2 \times \\ \times mes\Omega_1 + \int_{\Omega_2} \sigma_{cm} \left[\frac{\partial A_{\varphi}}{\partial t} \right]^2 d\Omega, \quad (5.31)$$

где $\text{mes}\Omega_1$ - это объем катушки с током.

Магнитные потери с учетом нелинейности задачи можно вычислить следующим образом:

$$P_M(t) = \int_{\Omega} \frac{\vec{B}}{\mu(B)} \frac{d\vec{B}}{dt}. \quad (5.32)$$

Таким образом, полезная мощность может быть вычислена по формуле (5.29) с учетом соотношений (5.30)...(5.32).

Отметим, что поскольку вся полезная мощность расходуется на перемещение якоря, она должна быть равна приращению кинетической энергии. То есть в каждый момент времени t работы двигателя должен выполняться баланс мощностей, который можно записать следующим образом:

$$P_{\Pi} = \frac{d\left(\frac{mV(t)^2}{2}\right)}{dt}, \quad (5.33)$$

где мощность P_{Π} определяется по формулам (5.29)...(5.32), а скорость $V(t)$ - в результате решения уравнения (5.27).

5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЭМД

На базе разработанной универсальной расчетной модели ЛЭМД создана программа, которая позволяет производить анализ особенностей работы ЛЭМД при изменении его геометрических размеров и свойств используемых магнитных материалов магнитопровода и обмоточного провода, жесткости возвратной пружины, формы импульса питающего напряжения включая питание от источников, выполненных по однополупериодной однофазной схеме с заданным углом управления. В программе также предусмотрена возможность изменения начального усилия поджатия возвратной пружины и начального усилия удержания якоря. Численные расчеты проводились при моделировании работы ЛЭМД типа ПЭМ-0,5 [10], геометрические размеры которого соответствуют двигателю, изображенному на рис. 5.2.

Катушка возбуждения двигателя с сопротивлением 0,41 Ом намотана медным проводом диаметром 1,7 мм и содержит 237 витков. В конструкции якоря и статора использовалась электротехническая сталь 3. При расчете использовалась кривая намагничивания, представленная на рис. 5.3, а удельное сопротивление стали было принято равным $0,33 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

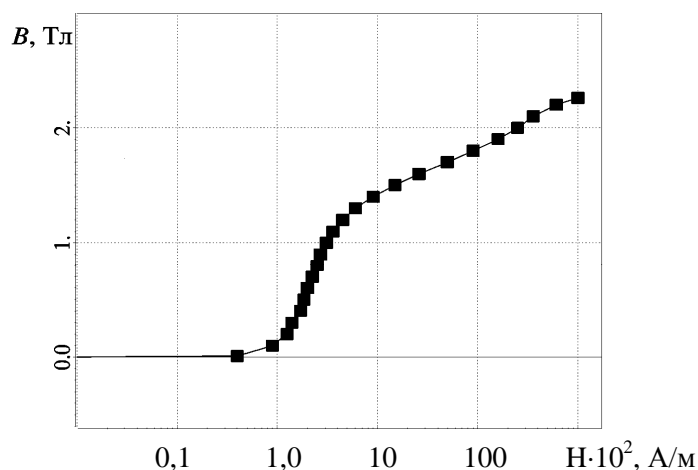


Рис.5.3. Кривая намагничивания

Для ЛЭМД с такими характеристиками в лабораторных условиях был проведен эксперимент, в результате которого были получены осциллограммы напряжения и тока, а также траектории движения якоря. Эти осциллограммы были оцифрованы и соответствующие графики приведены на рис. 5.4. Кроме того, в результате эксперимента была измерена скорость в момент удара [106]. На рис. 5.4 приведены экспериментально измеренные и полученные в результате расчета кривые тока. Из рисунка видно достаточно хорошее совпадение этих кривых во всем временном диапазоне работы ЛЭМД, при этом значения токов отличаются от максимального значения в пределах 3%.

Как видно из рис.5.4, в конце движения (в зоне скоростей $V > 3,5$ м/с при $t > 0,01$ с) кривые различаются не более чем на 4%. Время же рабочего процесса составляет 0,014 с и отличается от эксперимента всего на 1%. Небольшие различия траекторий наблюдаются в зоне малых скоростей и малых смещений якоря, но их значения соответствуют уровню погрешности эксперимента.

Измеренное в результате эксперимента значение скорости составляет 5,71 м/с. Однако это значение скорости является средним на интервале траектории перемещения якоря, равном 0,027...0,03 м. В то время как из графика расчетной скорости (рис. 5.5) видно, что значения 5,71 м/с скорость достигает в момент времени $t = 0,0136$ с. В этот момент времени значение перемещения (по расчетной кривой) составляет 0,028 м (рис. 5.4). Таким образом, различия между экспериментально измеренными и полученными в результате расчета значениями скорости в момент удара определяются только погрешностью измерений.

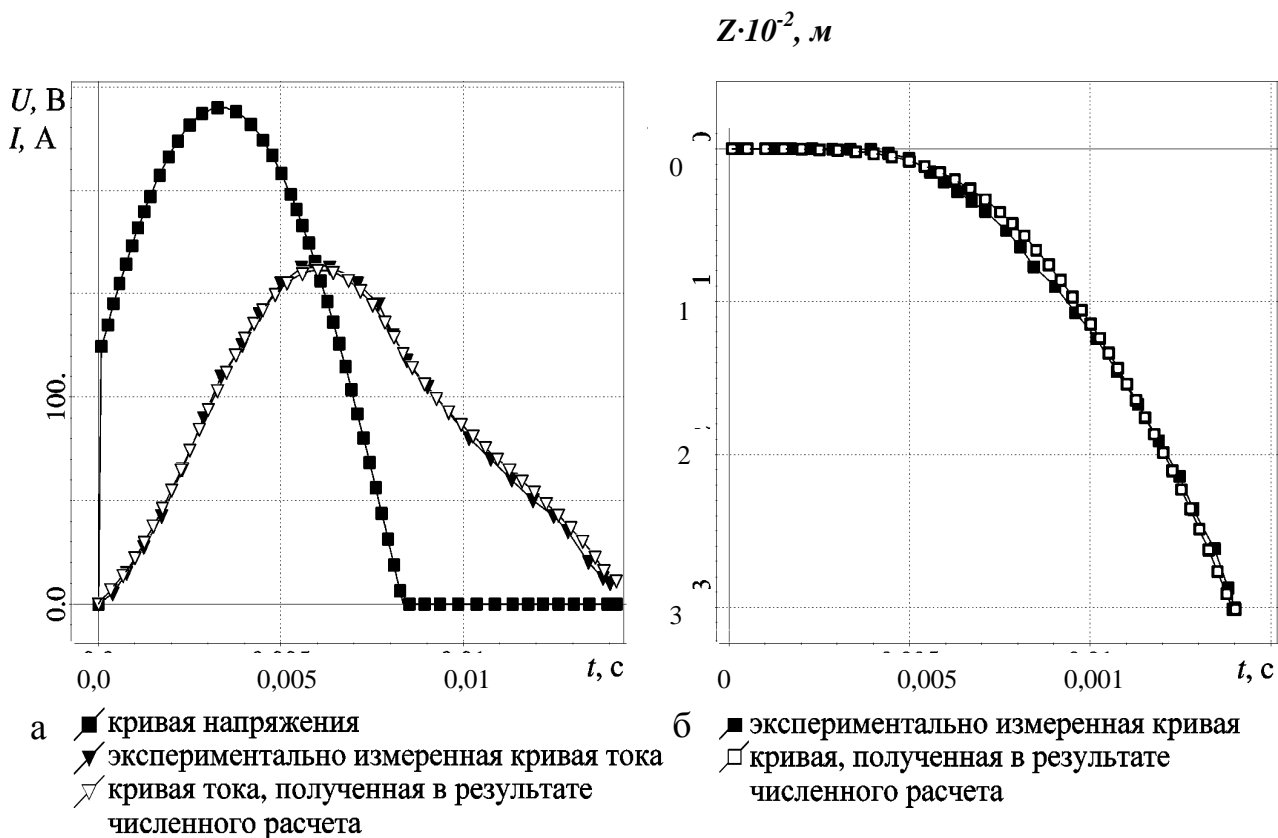


Рис. 5.4. Сравнение характеристик работы ЛЭМД: а – напряжение и кривые тока; б – траектории перемещения якоря

На рис. 5.5 приведен график скорости, полученной в результате расчета. Из графика видно, что значение скорости в момент удара равно 6,1 м/с.

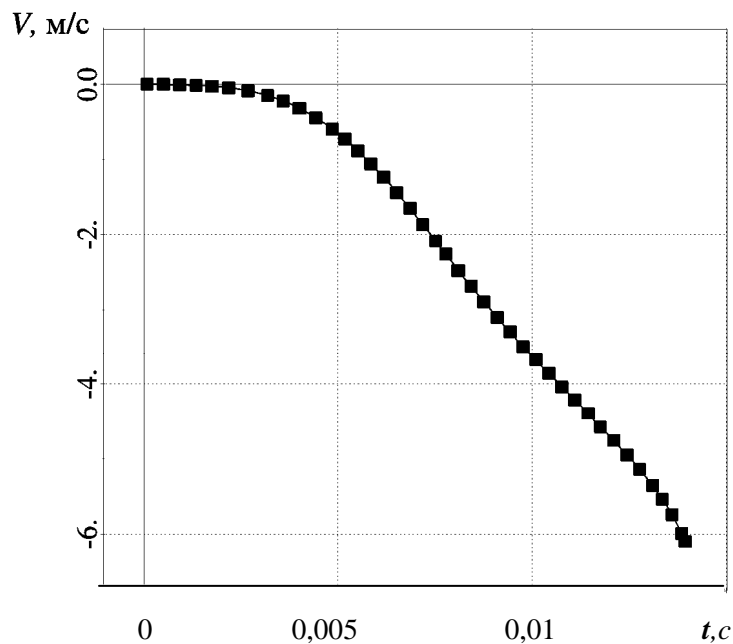


Рис.5.5. График скорости, полученной в результате расчета

На рис. 5.6 показана суммарная сила, действующая на якорь, и ее составляющие. Как видно, силы $F^Y(t)$ и $F^A(t)$ действуют в направлении, противоположном действию силы $F^M(t)$. При этом максимальное влияние силы $F^Y(t)$ составляет 0,7% от суммарной, то есть сила упругости практически не влияет на движение якоря.

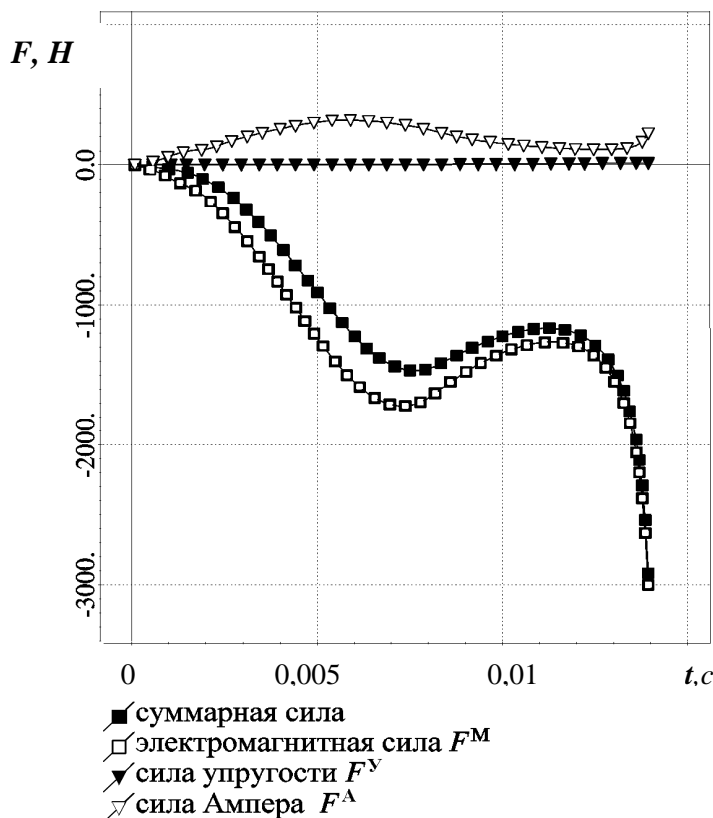


Рис. 5.6. Графики силы, действующей на якорь, и ее составляющих, полученные в результате расчета

Сила $F^A(t)$ оказывает очень существенное влияние в начале движения якоря (приблизительно в течение 0,004 с). По истечении 0,008 с ее влияние ограничивается 10...15%. Отметим, что по приведенным результатам можно точно оценить влияние каждой из составляющих силы в каждый момент времени работы ЛЭМД.

На рис. 5.7 а приведены графики потребляемой мощности, тепловых и магнитных потерь. Отдельно приведены графики тепловых потерь в магнитопроводе якоря и статора и в обмотке. На рис. 5.7 б приведены графики полезной мощности, полученные по формулам (5.29)...(5.32), и производной кинетической энергии. Как видно, эти графики практически совпадают, что свидетельствует о выполнении баланса мощностей (5.33).

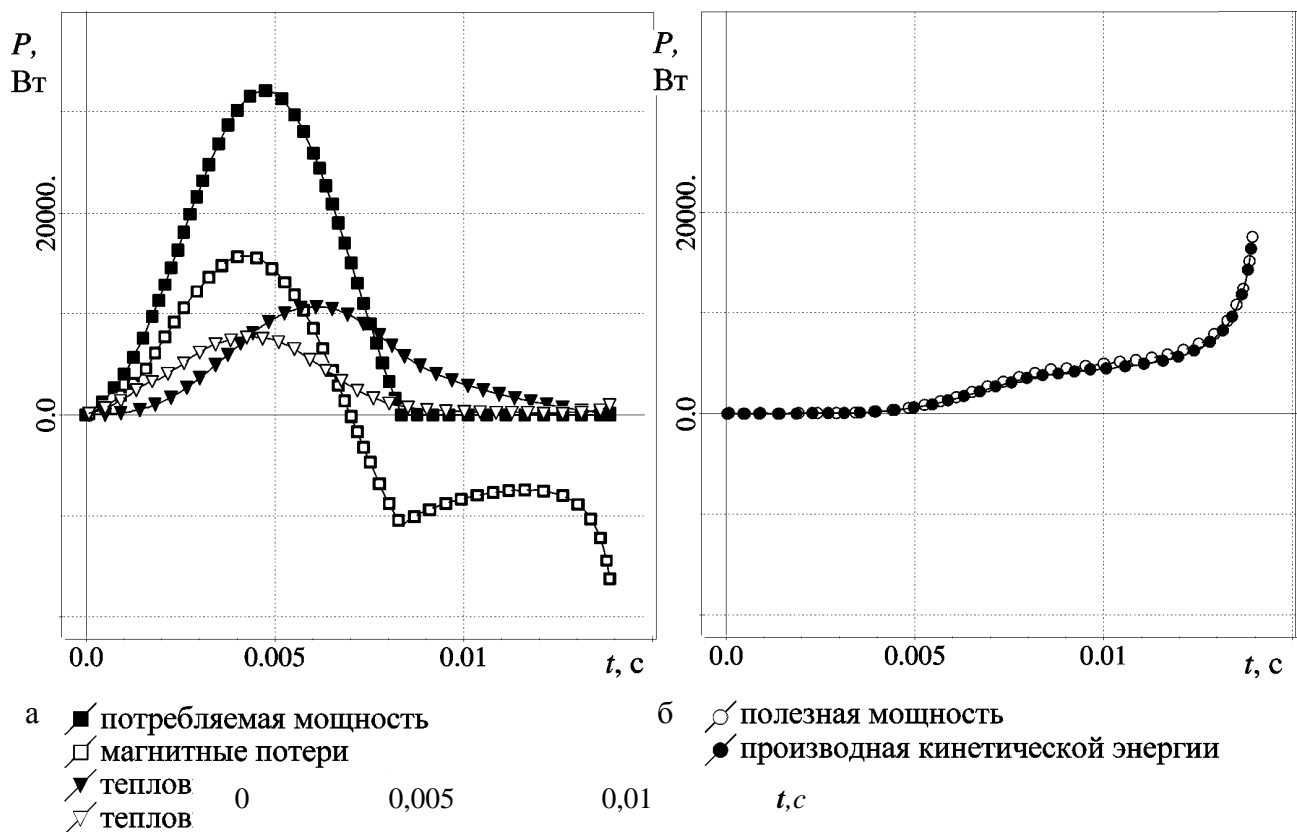


Рис. 5.7. Графики потребляемой, полезной мощностей, магнитных и тепловых потерь: а – баланс мощностей; б – составляющие полезной мощности

Для оценки степени влияния вихревых токов, наводимых в якоре и статоре, был выполнен дополнительный расчет в предположении, что материал, из которого изготавливаются якорь и статор, имеет нулевую электрическую проводимость.

На рис. 5.8 приведены графики изменения тока в обмотке и траекторий перемещения якоря, полученные с учетом и без учета вихревых токов. Анализ полученных зависимостей показывает, что в случае, когда в расчетах вихревые токи не учитывались, удар происходит на 0,00125 с раньше при скорости в момент удара 7,2 м/с. Напомним, что в случае, когда вихревые токи учитывались, скорость в момент удара составляла 6,1 м/с. При этом максимальное значение тока при расчете без учета и с учетом вихревых токов соответственно составляет 128 А и 161 А.

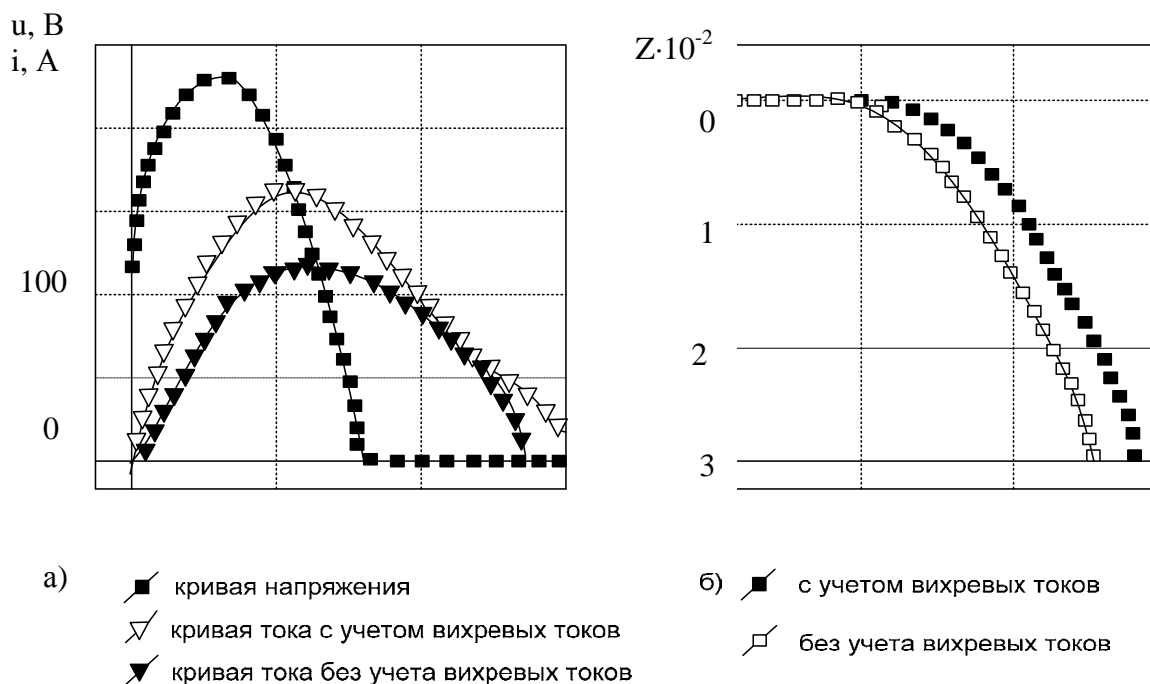


Рис.5.8. Сравнение характеристик работы ЛЭМД, полученных в результате расчета с учетом и без учета вихревых токов в железе: а – напряжение и кривые тока; б – траектории перемещения якоря

Таким образом, влияние вихревых токов на характеристики рассматриваемой конструкции ЛЭМД составляет приблизительно 15...20%.

5.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НЕУПРАВЛЯЕМОГО ОДНООБМОТОЧНОГО ЛЭМД

Исследуемая модель электромагнитного двигателя представляет собой многофакторную систему, которая характеризуется рядом выходных параметров (рис. 5.4...5.8).

Основным вопросом, который решает моделирование рабочих процессов ЛЭМД, является повышение их силовых и энергетических показателей, что осуществляется посредством изучения особенностей энергопреобразования в двигателе и определения влияния на них режимных и конструктивных параметров.

При моделировании системы ЛЭМД задача исследований ставится следующим образом: определить значения некоторой совокупности факторов системы из возможной области их варьирования, обеспечивающих максимум выходного показателя. Такая постановка задачи не только позволяет оптимизировать значение выходной функции (показателя), но и установить тенденцию его изменения и степень влияния на него факторов, входящих в систему ЛЭМД в виде режимных и конструктивных параметров. Только подобная проработка

вопросов динамики позволит добиться высокой эффективности работы импульсных ЛЭМД за счет осуществления более высокой эффективности использования электрической энергии в рабочем цикле.

Объектом исследований является однообмоточный ЛЭМД с пружинным возвратом, выполненный по схеме рис. 5.1. При работе ЛЭМД на обмотку подается импульс напряжения заданной формы и длительности.

Путем изменения параметров импульса питающего напряжения и влияющих входных факторов можно воздействовать на рабочий процесс в ЛЭМД.

Предварительное испытание физической модели ударного узла позволило выявить следующее. При заданных геометрических размерах выходные параметры (энергия A_y , предударная скорость движения якоря v_{max} , ток трогания $i_{тр}$ и время трогания $t_{тр}$, максимальное значение тока в процессе движения i_{max} , время движения $t_{дв}$ и полное время срабатывания t_{max}) зависят от импульса напряжения питающей электрической сети $u(t)$, начального положения якоря δ_0 , жесткости возвратной пружины $k_{пр}$, приложенной к якорю начальной противодействующей силы $F_{п}$, присоединенной массы m и числа витков обмотки возбуждения w . От перечисленных выше факторов зависит также и экономичность работы импульсной системы ЛЭМД, то есть коэффициент полезного действия.

Таким образом, факторами, определяющими рабочий процесс электромагнитного двигателя, являются параметры импульса питающего напряжения (форма и длительность) и перечисленные выше входные параметры, обуславливающие структуру электромеханической системы. Формирование импульсов напряжения и заданных входных параметров системы можно осуществлять самыми разнообразными способами, при этом необходимо учитывать ограничения, накладываемые условиями проектирования системы.

Рассмотрим случай однократного процесса ускорения якоря магнитным полем (случай единичного удара) в переходном режиме работы системы. В качестве импульса питающего напряжения примем импульс наиболее характерной прямоугольной формы, к тому же формирование импульсов напряжения прямоугольной формы осуществляется достаточно простыми средствами, производящими коммутацию тока в обмотке электромагнитного двигателя. В исходном положении якорь находится в крайнем верхнем положении за счет усилия предварительно поджатой пружины. При подаче на обмотку импульса напряжения протекающий по ней ток создает тяговое усилие. В момент времени $t_{тр}$, когда тяговое усилие превысит силы сопротивления движению, якорь совершает рабочий ход за время $t_{дв}$. Для обеспечения максимального ускорения на интервале времени движения ударной массы необходимо, чтобы длительность импульса питающего напряжения превышала время движения $t_{дв}$.

В результате численного моделирования получены зависимости энергии удара A_y , конечной скорости движения V_{max} и ускорения a_{max} якоря, а также

максимального тока i_{\max} от длительности приложенного импульса напряжения источника, которые приведены на рис. 5.9.

Из представленных на рис. 5.9 характеристик следует, что оптимальная длительность импульса, обеспечивающая максимальное значение энергии удара A_y , соответствует $t_{и} = 0,021\text{с}$. Из этой же характеристики видно, что увеличение длительности импульса не приводит к росту энергии удара, так как за это время якорь успевает совершить рабочий ход и нанести удар. Поэтому увеличение длительности импульса питающего напряжения приводит только к росту потерь и, как следствие, снижению КПД.

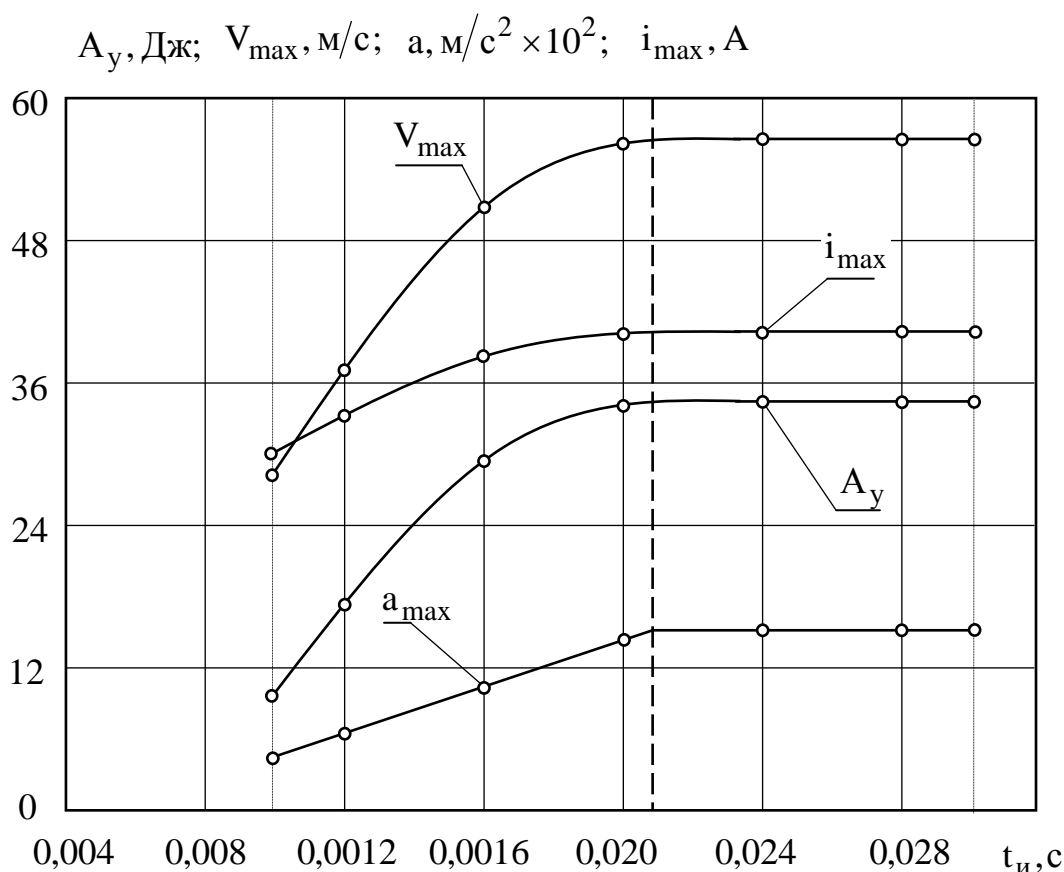


Рис. 5.9. Энергия удара A_y , конечная скорость V_{\max} и ускорение якоря a_{\max} , максимальное значение тока i_{\max} за время движения ЛЭМД при различных длительностях $t_{и}$

При условии снижения энергии удара на 5% допустимо ограничение длительности импульса напряжения источника не более чем на 10%. При отключении источника питания на конечном участке рабочего хода движение ударной массы может происходить по инерции. Длительность импульса источника питания, обеспечивающая ударный режим работы, не должна быть менее чем $0,5 t_{\max}$.

Исследование зависимости выходных показателей от числа витков обмотки приведены на рис. 5.10...5.12. На рис. 5.10 видно существование некоторого оптимума числа витков в случае минимального времени движения якоря. Расчетные зависимости полностью согласуются с характером изменения кривых, полученных опытным путем [83]. Изменение напряжения источника питания не оказывает влияния на указанный оптимум, который находится в интервале $w = 400...600$.

Следует также отметить, что уменьшение количества витков относительно оптимума в большей степени оказывает влияние на повышение времени рабочего хода якоря, чем их увеличение.

Аналогичные кривые, указывающие на критичность выбора количества витков обмотки возбуждения, получены для максимального времени рабочего хода t_{\max} и времени трогания $t_{\text{тр}}$ (рис. 5.11). Наличие некоторого оптимума времени трогания наблюдается только при повышенном напряжении источника $U = 250$ В. С увеличением числа витков время трогания резко возрастает. Значения времени трогания, соответствующие максимальному и минимальному количеству витков, отличаются примерно в четыре раза.

С целью выявления возможности уменьшения массы активных материалов электромагнитного двигателя за счет повышения энергии удара на рис. 5.12 представлены зависимости энергии удара от выбранного числа витков обмотки возбуждения. Полученные зависимости $A_y=f(w)$ указывают на наличие явно выраженного максимума количества витков, который полностью удовлетворяет критерию оптимальности, полученному после выполненных исследований, результаты которых представлены на рис. 5.10 и рис. 5.11.

Дальнейшими исследованиями было установлено влияние количества витков на значение тока трогания $i_{\text{тр}}$ и максимальное значение тока i_{\max} на интервале движения якоря.

С увеличением числа витков обмотки значения указанных параметров (тока трогания $i_{\text{тр}}$ и максимального значения тока i_{\max}) уменьшаются по квадратичному закону, причем замена фактических значений токов усредненным даже на весьма малом диапазоне изменения числа витков может привести к значительной погрешности (рис. 5.12).

При уменьшении числа витков обмотки ЛЭМД относительно оптимального время движения резко возрастает. Существенно возрастает также среднее значение тока за время разгона ударной массы, что увеличивает тепловые потери, изменяющиеся пропорционально квадрату тока.

Результаты оценок, выполненных по полученным зависимостям, показали (рис. 5.12), что для неуправляемого процесса движением при оптимальном числе витков значения токов, установившегося $I_{\max} = U/r$ и максимального значения тока за время движения определяется отношением $i_{\text{тр}}/I_{\max} = 0,45...0,55$.

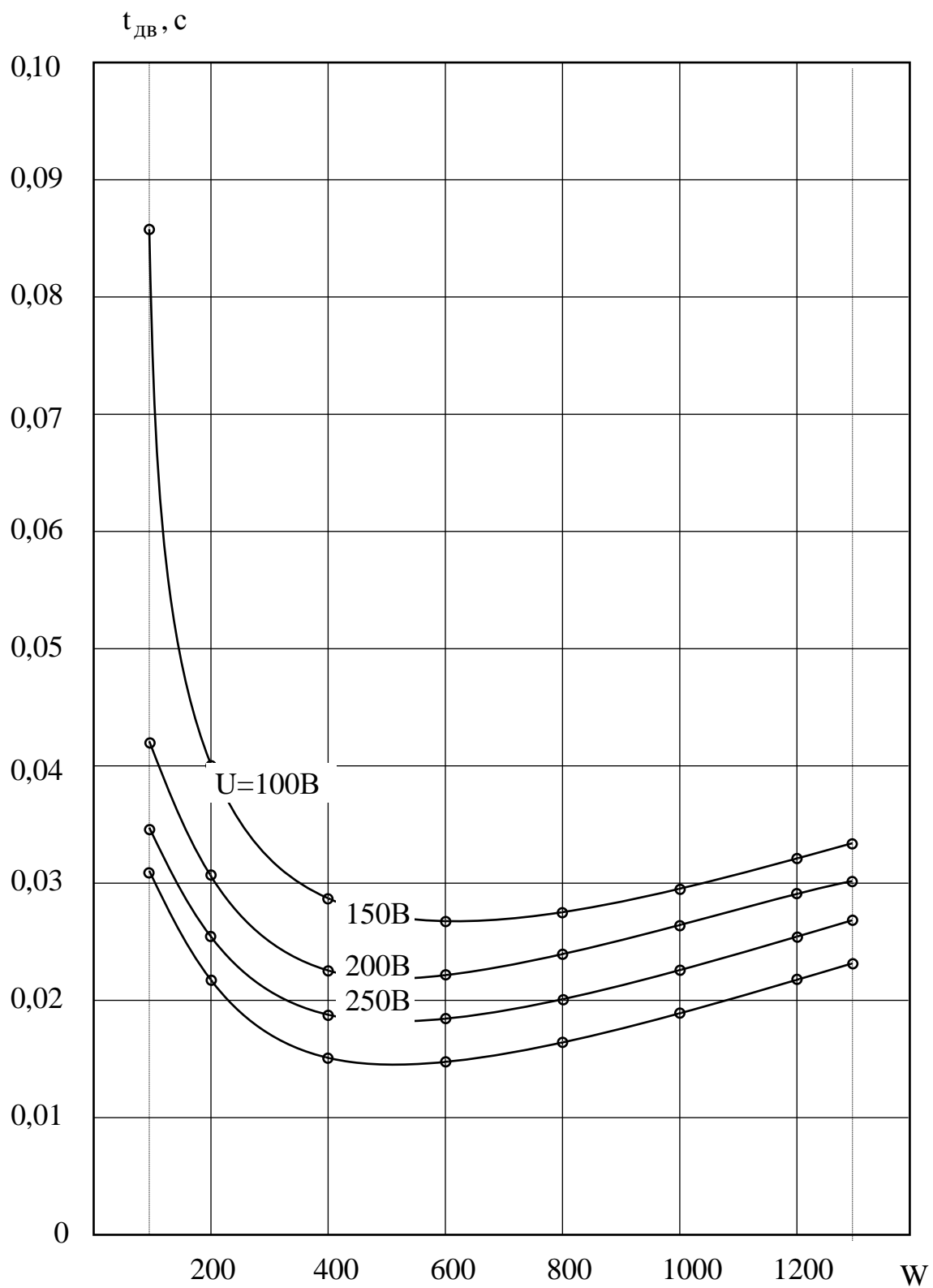


Рис. 5.10. Зависимости времени движения $t_{дв}$ от числа витков обмотки w

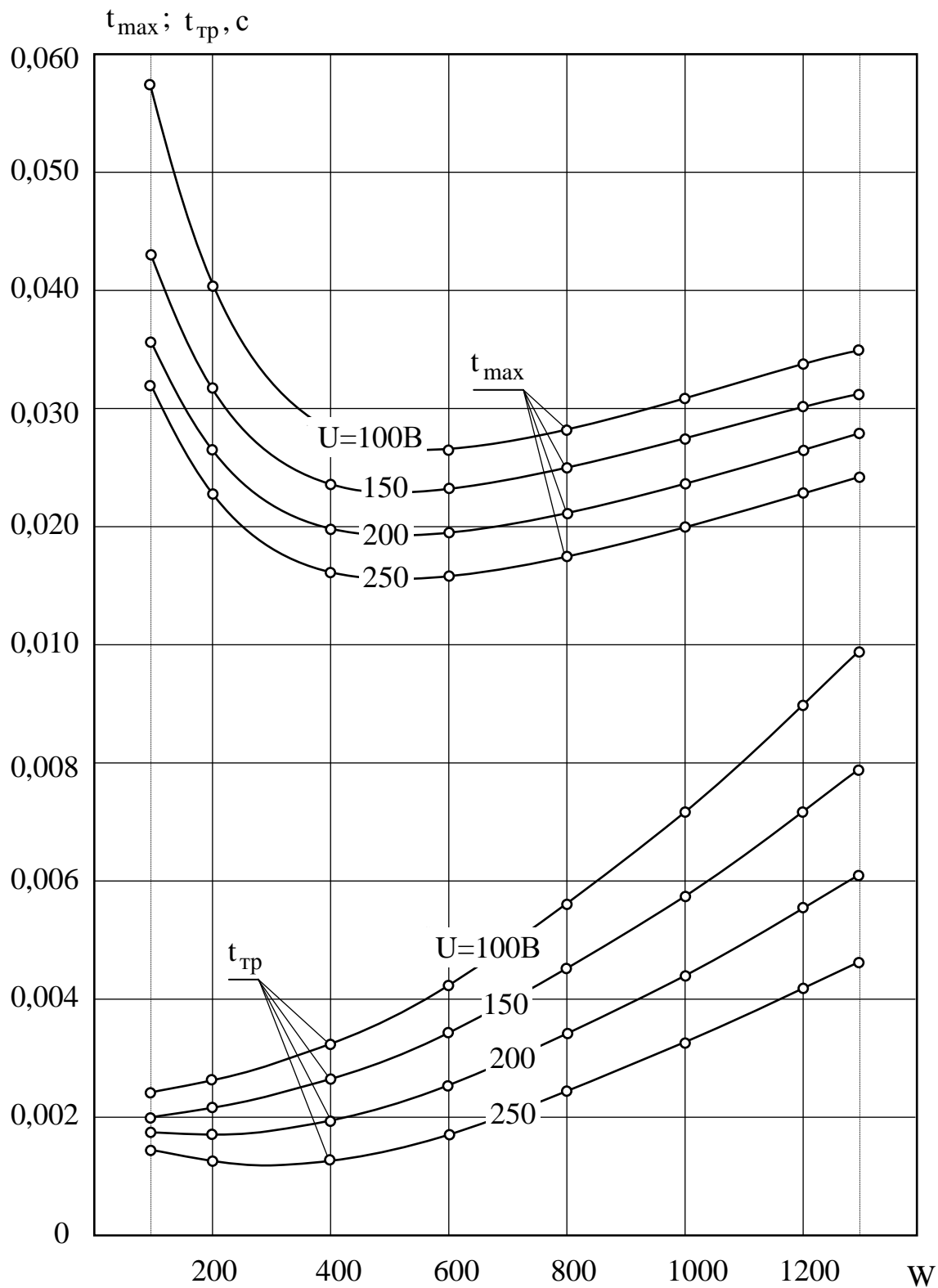


Рис. 5.11. Зависимости времени трогания $t_{тр}$ и максимального времени рабочего хода t_{max} от числа витков обмотки w

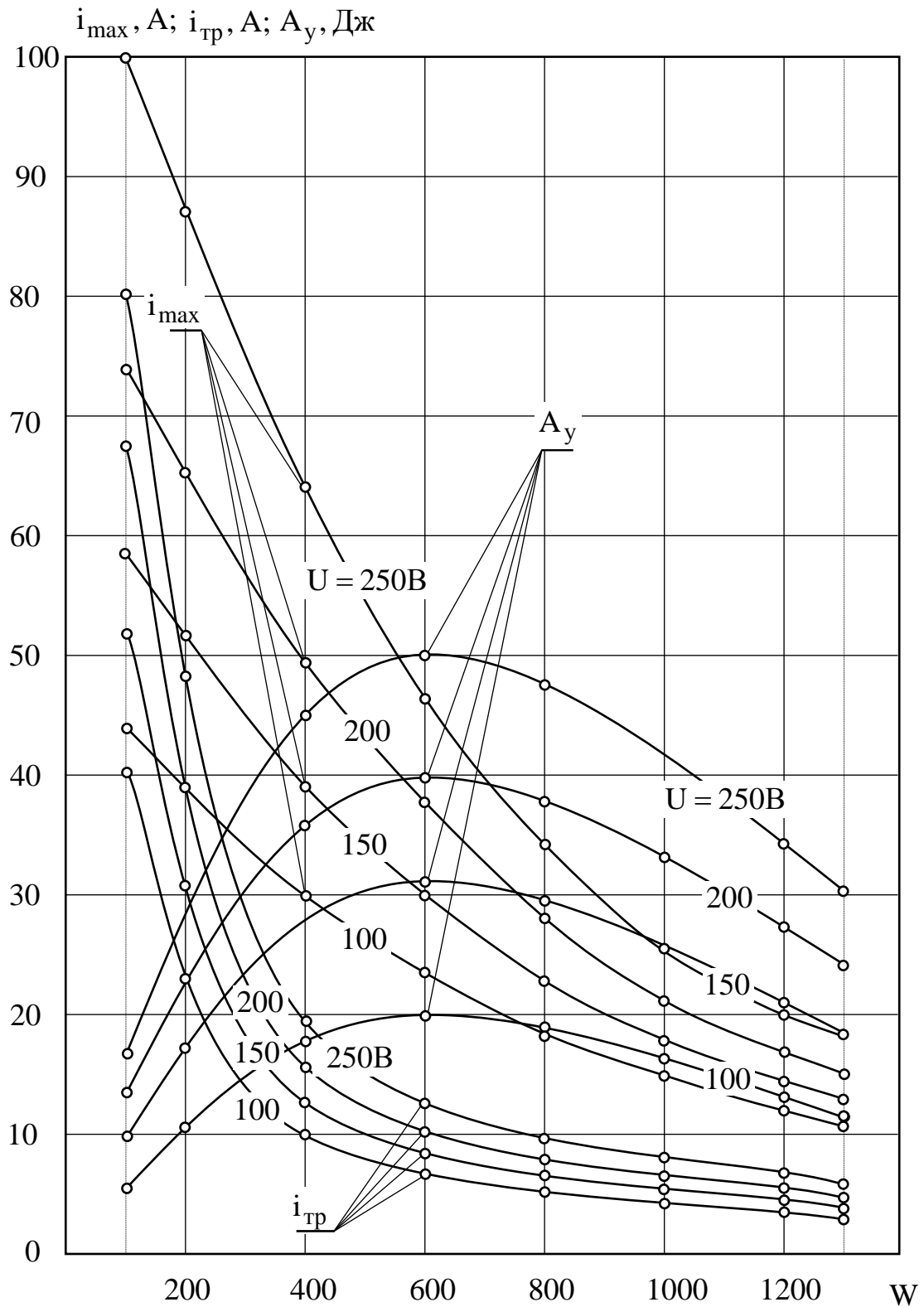


Рис. 5.12. Зависимости энергии удара A_y , тока трогания $i_{\text{тр}}$ и максимального тока i_{\max} за время движения от числа

На рис. 5.13 представлены зависимости времени трогания $t_{тр}$ и времени движения от приложенного напряжения источника. Зависимости $t_{тр}=f(U)$ и $t_{дв}=f(U)$ показывают монотонное снижение времени трогания и времени движения при увеличении подводимого напряжения. Необходимо также учитывать, что снижение времени трогания можно добиться как за счет повышения напряжения источника, так и за счет уменьшения количества витков обмотки.

Тенденции изменения выходных показателей в зависимости от противодействующей силы представлены на рис. 5.14 и рис. 5.15. При моделировании процессов характер изменения противодействующей силы $P_{п}$ на всем интервале движения якоря принимается постоянным.

На основании результатов численного моделирования можно сделать вывод, что, несмотря на то, что с ростом противодействующей силы время трогания монотонно возрастает (рис. 5.14), время движения уменьшается и достигает некоторого оптимального значения. Дальнейшее увеличение $t_{дв}$ противодействующей силы после достижения оптимальной величины приводит к монотонному росту времени движения. Увеличение противодействующего усилия также приводит к росту тока трогания и максимального тока за время движения. Изменение величин тока трогания и максимального тока происходит практически по линейному закону (рис. 5.15). Появление некоторого оптимума противодействующего усилия $P_{п}$ при его увеличении влияет на уровень энергии удара (рис. 5.15). Как видно из полученных зависимостей, значение энергии удара при оптимальном значении противодействующей силы на 10...15% выше ее величины при нулевой противодействующей силе $P_{п} = 0$. Объясняется это тем, что по мере увеличения противодействующего усилия возрастает ток трогания и начальное электромагнитное усилие, изменяющееся пропорционально квадрату тока. Следовательно, при одинаковом ходе якоря и при наличии противодействующей силы, отличающейся от нуля, следует ожидать увеличения среднего значения электромагнитной силы и, как следствие, конечной скорости якоря и энергии удара.

При дальнейшем увеличении противодействующей силы относительно оптимального значения, несмотря на то, что среднее значение тока на интервале движения будет расти, электромагнитной силы будет недостаточно для того, чтобы переместить якорь с более высокой скоростью в конечное положение и повысить его кинетическую энергию. Крайним случаем здесь следует рассматривать режим, когда из-за высокого значения противодействующего усилия электромагнитной силы будет недостаточно, чтобы переместить якорь в крайнее положение к моменту завершения протекания тока в обмотке.

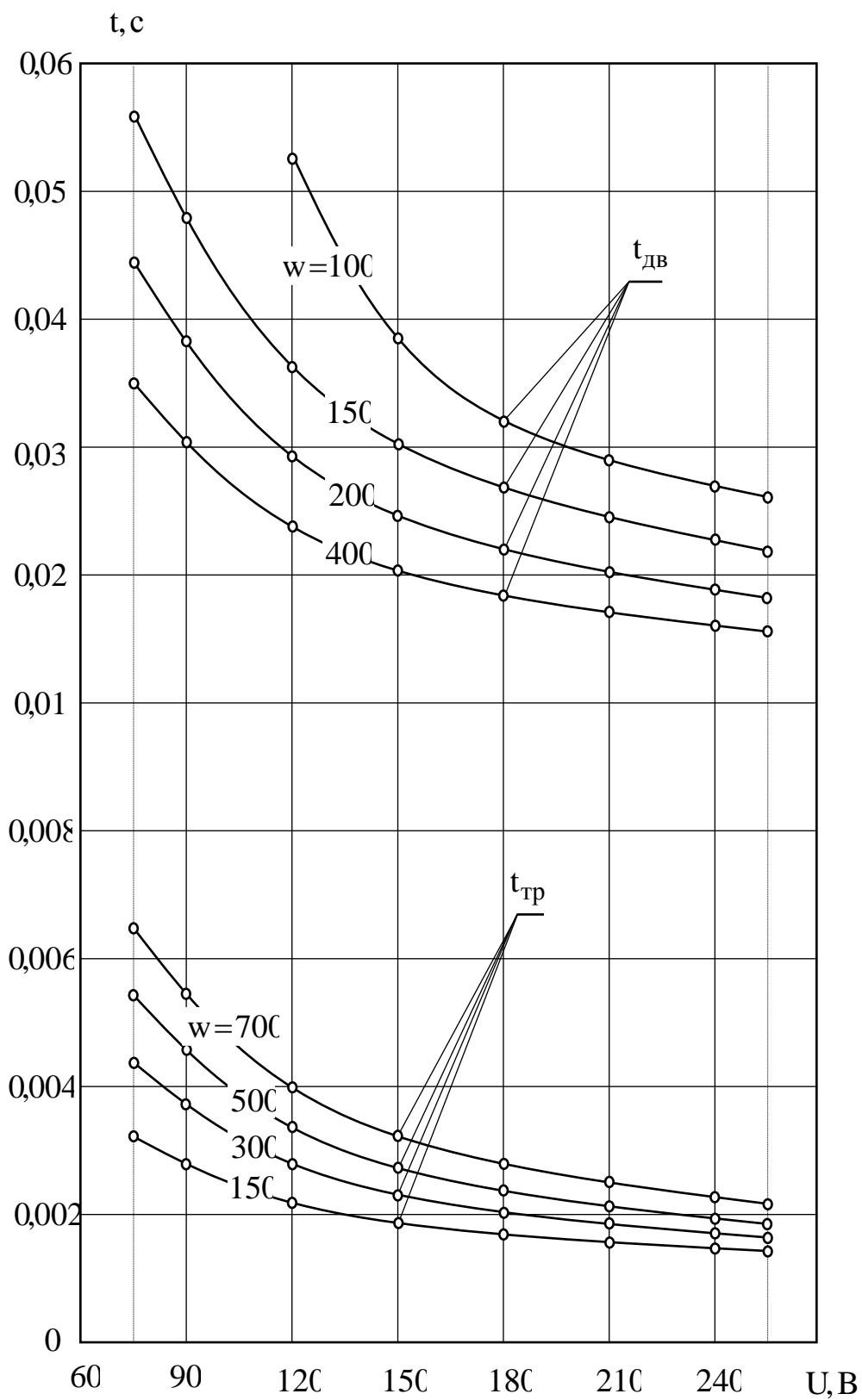


Рис. 5.13. Зависимости времени трогания $t_{тр}$ и движения $t_{дв}$ от приложенного напряжения U

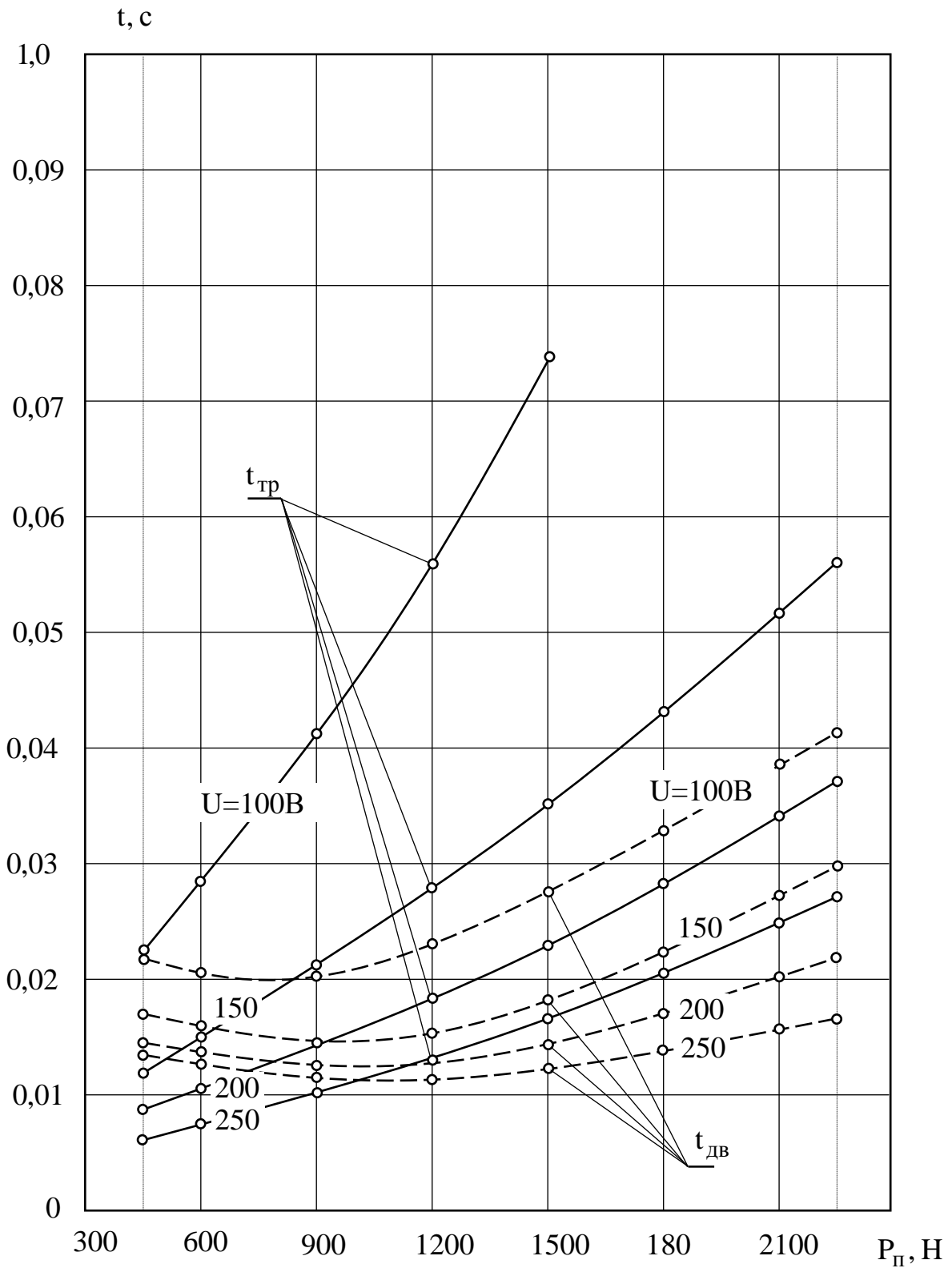


Рис. 5.14. Зависимости времени рабочего хода t_{max} и времени трогания t_{tr} от приложенной противодействующей силы P_{II}

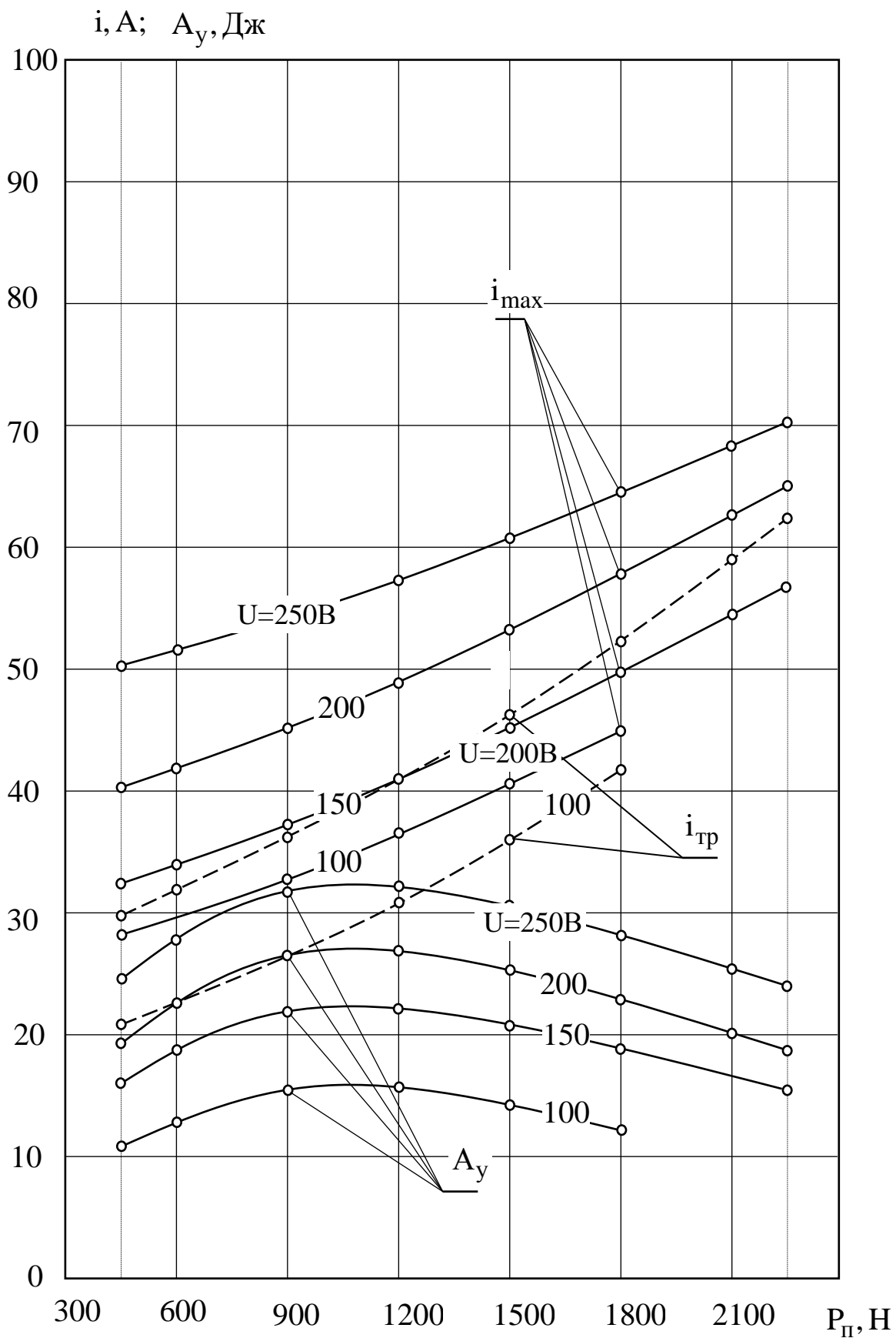


Рис. 5.15. Зависимости энергии удара A_y , тока трогания i_{tr} и максимального тока движения i_{max} от приложенной противодействующей силы P_n

В качестве идеального режима энергопреобразования следует рассматривать движение якоря при нулевой противодействующей силе, воздействие которой проявляется только на этапе трогания, то есть в режиме статического индуктивного накопителя магнитной энергии [71; 91; 101; 120; 121; 206.].

Рассчитанные значения выходных показателей ЛЭМД в зависимости от жесткости возвратной пружины представлены на рис. 5.16. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что увеличение жесткости пружины оказывает существенное влияние на все выходные показатели, снижая их уровень. Поэтому главным критерием при выборе жесткости пружины является только нормальное функционирование ударного узла, обеспечивающее требуемое быстрое действие.

При проектировании ударных устройств важным вопросом является влияние на энергию удара присоединенной к якорю массы. Результаты исследования данного вопроса представлены на рис. 5.17 и 5.18. С увеличением ударной массы время трогания $t_{тр}$ не изменяется, а время срабатывания t_{max} линейно возрастает (рис. 5.17). Из чего следует, что с увеличением массы время движения $t_{дв}$ также возрастает по линейному закону.

Поскольку увеличение присоединенной массы вызывает увеличение времени рабочего хода, исследования выполнены с учетом корректировки длительности импульса источника. С практической точки представляют интерес результаты исследований, приведенные на рис. 5.18, устанавливающие зависимость конечной скорости и энергии удара от присоединенной к якорю технологической массы. Из зависимостей на рис. 5.18 следует, что увеличение массы приводит к уменьшению конечной скорости якоря V_{max} при одновременном повышении энергии удара A_y .

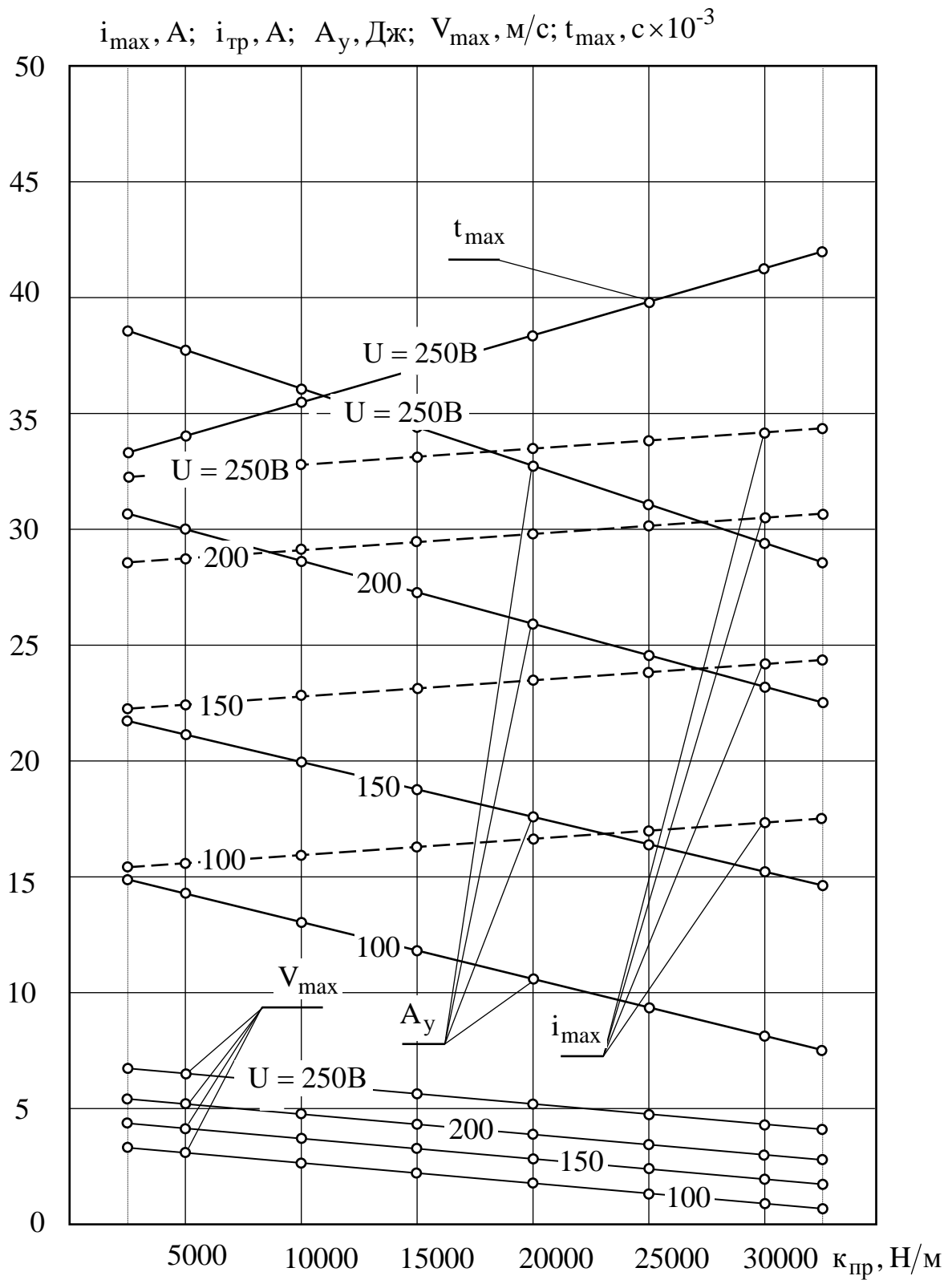


Рис. 5.16. Зависимости энергии удара A_y , максимальной скорости движения якоря V_{\max} и тока i_{\max} , времени рабочего хода t_{\max} от жесткости возвратной пружины $k_{\text{пр}}$

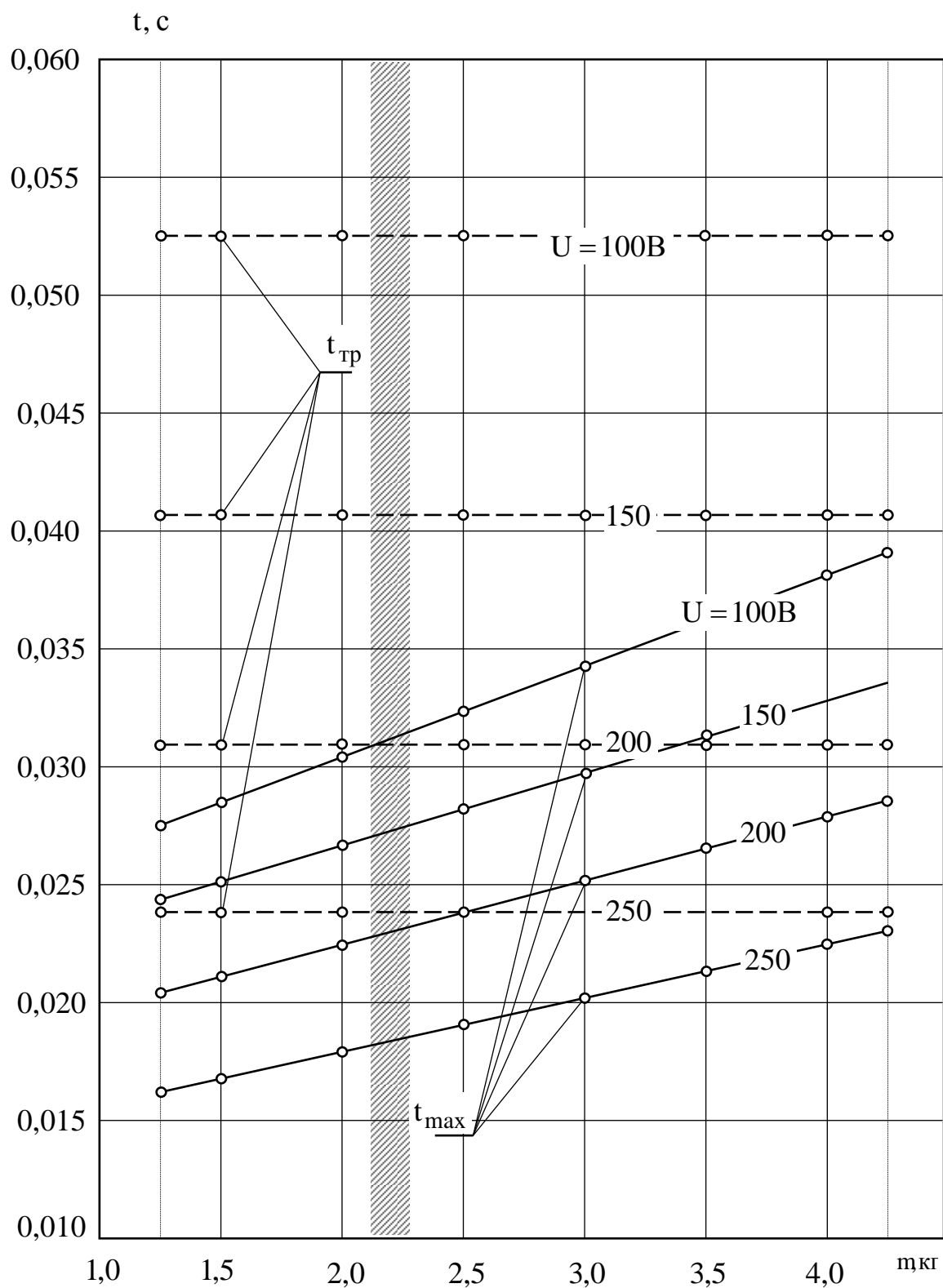


Рис. 5.17. Зависимости времени трогания $t_{тр}$ и времени рабочего хода t_{max} от присоединенной к якорю массы m

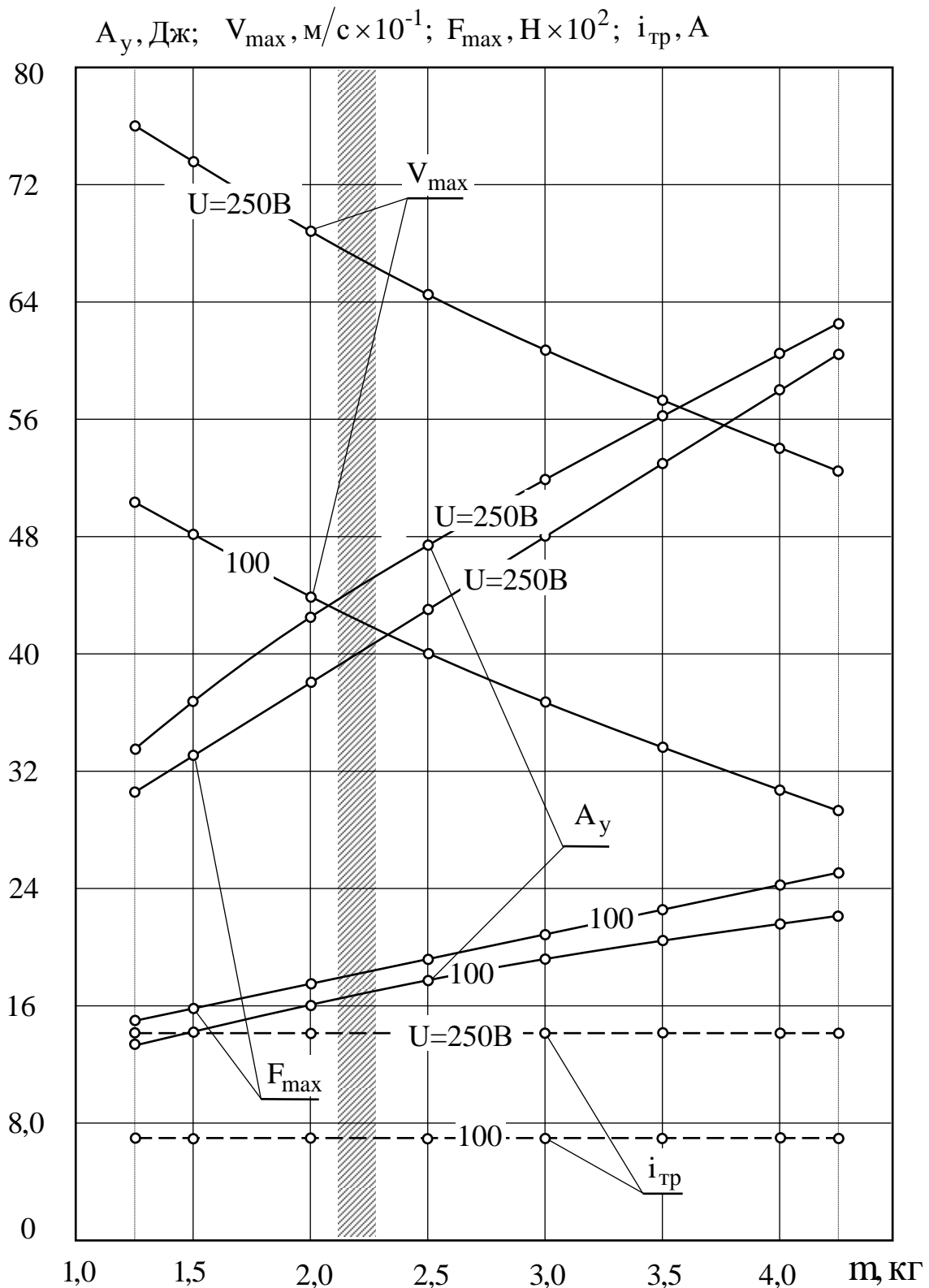


Рис. 5.18. Зависимости энергии удара A_y , максимальной скорости движения якоря V_{max} и электромагнитного усилия F_{max} , тока трогания $i_{тр}$ от присоединенной к якорю массе m

Увеличение массы также приводит к повышению электромагнитной силы, приложенной к якорю, что можно объяснить увеличением среднего значения тока за время движения.

Сравнение зависимостей (рис. 5.18) показывает, что увеличение присоединенной к якорю массы, например, в 1,5 раза относительно ее расчетного значения, соответствующего условию электромагнитных нагрузок (заштрихованная зона на рис. 5.18), приводит к увеличению энергии удара на 20% и уменьшению конечной скорости движения якоря на 15%. Рассмотрение гипотетического случая уменьшения массы якоря относительно расчетной величины (область на графике (рис. 5.18), расположенная слева от заштрихованной зоны) позволяет убедиться в том, что тенденция изменения показателей скорости и энергии удара сохраняется. Таким образом, на основании результатов численного моделирования можно сделать вывод о линейной связи между энергией удара и конечной скоростью движения якоря.

Справедливость полученных расчетных зависимостей, представленных на рис. 5.9...5.18, была проверена на физической модели ЛЭМД с усилием 5 кН. Экспериментальная проверка показала различие зависимостей, полученных в результате численного моделирования и опытным путем, не более чем на 15%.

Полезность полученных зависимостей состоит том, что в случае отсутствия исчерпывающей информации для вновь разрабатываемых устройств они позволяют оценить влияние входных факторов на стадии эскизного проекта и с меньшими затратами времени приблизиться к оптимальному варианту исполнения.

5.4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЯЕМОГО ОДНООБМОТОЧНОГО ЛЭМД С ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

Способ повышения динамической эффективности ЭМД за счет удержания якоря до начала движения позволяет улучшить его энергетические характеристики. Для этого изучался рабочий процесс ЛЭМД с рабочим циклом, суть которого заключается в том, что импульс напряжения источника подводится к двигателю, управление которого осуществляется по механическому каналу внешними силами, практически не изучался.

Полученные в результате численного моделирования графики (рис. 5.15), отражающие зависимость характеристик рабочего процесса от действия постоянно приложенной противодействующей силы, свидетельствуют о наличии некоторого оптимума энергии удара. Аналогичный процесс, обеспечивающий повышение энергии удара, возникает в исследуемых ЛЭМД с удержанием якоря. Отличие только в том, что распределение противодействующего усилия за время цикла осуществляется по-другому. Так, в течение процесса с

постоянно приложенным к якорю противодействующим усилием энергия, затрачиваемая на его преодоление при перемещении якоря, полезной работы не производит. В ЛЭМД с управлением по механическому каналу с помощью устройств удержания в соответствии с требованиями, предъявляемыми к этим устройствам, противодействующее усилие обеспечивается в начале хода при крайне малом сопротивлении движению на остальной части хода и энергопотреблении [10; 206; 309; 310]. При рассмотрении данного рабочего процесса полагаем, что движение якоря начинается с определенного значения электромагнитного усилия, равного противодействующему усилию сопротивления движению. Управление противодействующим усилием осуществляется по механическому каналу и характеризуется вполне определенным значением тока трогания и магнитной энергией, запасаемой в магнитном поле.

В связи с этим необходимо определить, как влияет интенсификация рабочего процесса с предварительным аккумулярованием магнитной энергии на выходные показатели ЛЭМД и каким образом следует осуществлять предварительный запас энергии в магнитном поле, чтобы обеспечивать максимальную эффективность энергопреобразовательного процесса в рабочем цикле.

Результаты численного моделирования одного из исследуемых ЛЭМД, питаемого прямоугольными импульсами напряжения, представлены на рис. 5.19...5.23. Сначала были получены осциллограммы рабочего процесса исследуемого ЛЭМД с удержанием якоря. Жесткость возвратной пружины ($k_{пр} = 431 \text{ Н/м}$) выбрана из условия гарантированного возврата якоря после совершения им рабочего хода.

Варьирование начального запаса энергии в магнитном поле регулировалось с помощью задания противодействующего усилия $F_{уд}$, приложенного к якорю, а момент отрыва якоря, от которого осуществлялось движение, – фиксацией тока трогания $i_{тр}$. При токе трогания $i_{тр}$, равном установившемуся току, магнитная энергия, запасаемая в поле, является максимальной.

Из полученных осциллограмм определялись временные параметры цикла ($t_{тр}$, $t_{дв}$, t_{max}), максимальное значение тока в процессе движения (i_{max}), конечная скорость якоря (V_{max}), энергия удара (A_y), КПД.

В проводимых исследованиях временные характеристики рабочего цикла ЛЭМД рассмотрены относительно изменения тока трогания, зависящего от усилия отрыва якоря. С увеличением тока трогания $t_{тр}$ время срабатывания t_{max} также возрастает (рис. 5.19). Несмотря на общее увеличение времени срабатывания t_{max} , время движения $t_{дв}$ уменьшается. При этом наблюдается существенное снижение времени движения. Увеличение усилия удержания якоря $F_{уд}$, а следовательно, и энергии, запасаемой в магнитном поле, приводит к увеличению тока трогания $i_{тр}$ и максимального значения тока i_{max} на интервале движения (рис. 5.20).

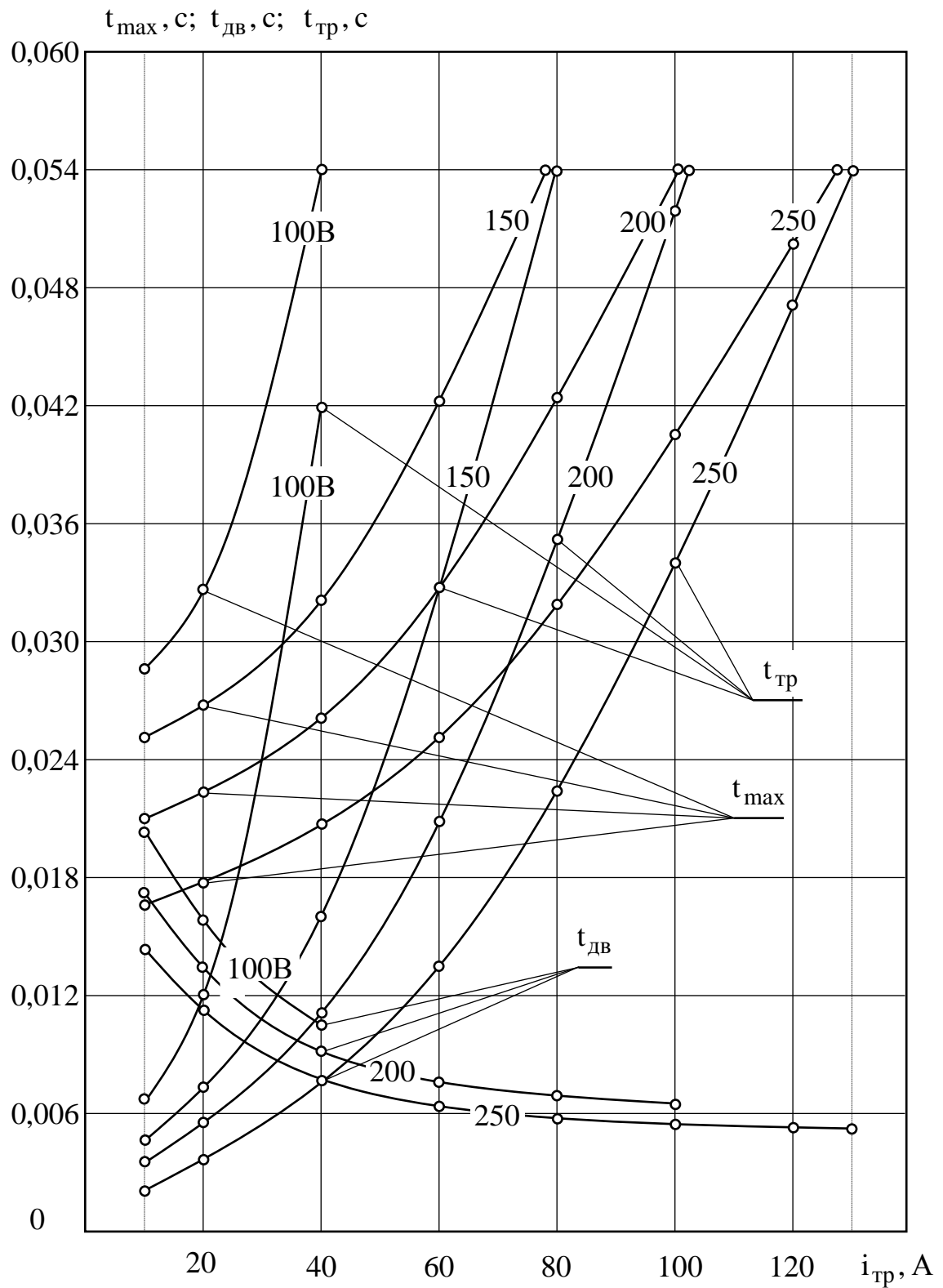


Рис. 5.19. Зависимости времени трогания $t_{тр}$, движения $t_{дв}$ и рабочего хода t_{max} от начального тока отрыва якоря

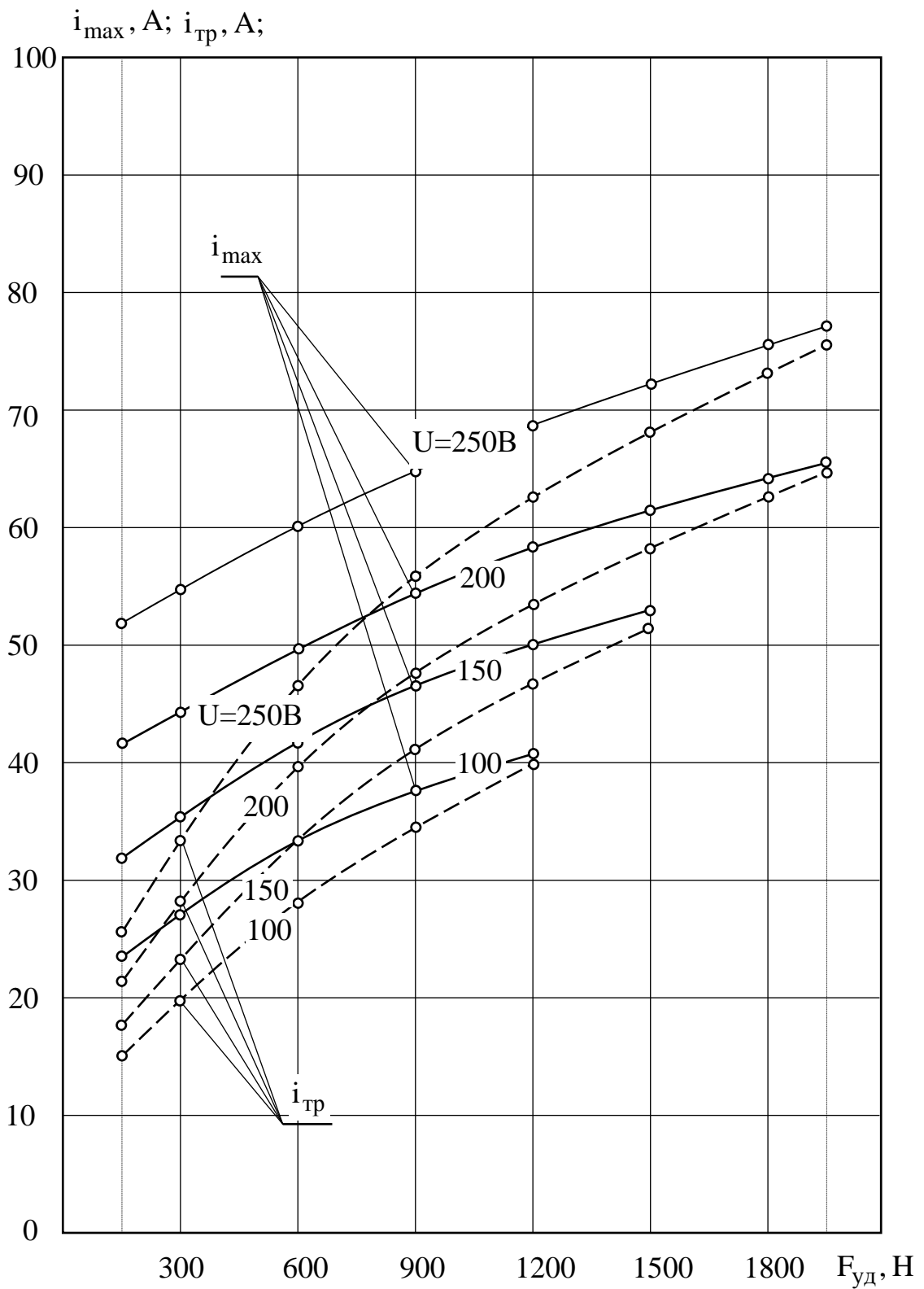


Рис. 5.20. Зависимости максимального тока i_{max} за время движения и тока трогания $i_{тр}$ якоря от усилия удержания якоря $F_{уд}$

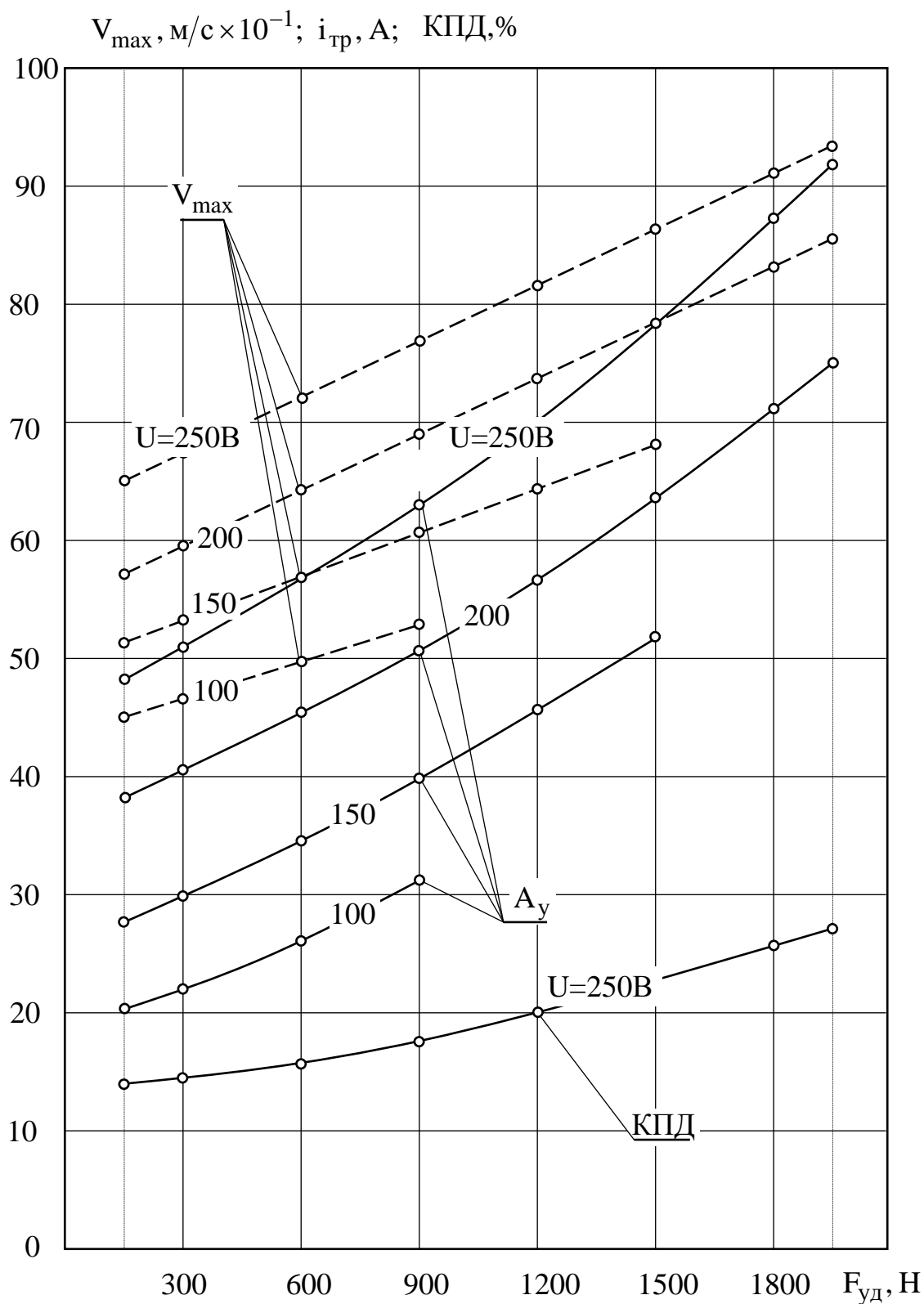


Рис. 5.21. Зависимости энергии удара A_y , максимальной скорости движения якоря V_{\max} , тока трогания $i_{\text{тр}}$ и КПД от усилия удержания якоря $F_{\text{уд}}$

Зависимости, отражающие влияние силы удержания на энергию удара, представлены на рис. 5.21. С увеличением удерживающего усилия энергия удара A_y , как и конечная скорость V_{\max} движения якоря, возрастает.

Увеличение энергии удара и конечной скорости механического движения якоря с увеличением удерживающего усилия сопровождается также заметным повышением КПД. Это повышает эффективность энергопреобразовательного процесса устройств, реализующих способ статического индуктивного накопителя магнитной энергии [10; 71; 101; 150].

На рис. 5.22 для сравнения приведены зависимости энергии удара и КПД однообмоточного ЛЭМД с пружинным возвратом якоря в режиме статического индуктивного накопителя и неуправляемого режима движения, построенные при варьировании начальной величины рабочего хода якоря.

Из рис. 5.22 следует, что более высокая энергия удара соответствует процессу с максимальной величиной хода якоря. Как показали расчеты, применение режима с предварительным накоплением магнитной энергии сохраняет свою эффективность во всем диапазоне рабочих ходов. Однако если КПД энергопреобразования не является определяющим фактором и недостаток энергии может быть скомпенсирован за счет увеличения рабочего хода, то целесообразность использования устройств, выполненных по схеме без накопления, является вполне очевидной. В этом случае имеется возможность упростить кинематическую схему исполнительного устройства и устройства, осуществляющего его управление.

Особое значение в ЛЭМД имеют процессы интенсификации в режиме предварительного аккумулирования магнитной энергии. Использование таких режимов позволяет увеличить полезную механическую работу и добиться повышения КПД энергопреобразования. Задачей дальнейших исследований является оценка интервала времени относительно времени рабочего хода t_{\max} , в течение которого можно осуществить запас энергии в магнитном поле при условии достижения максимального КПД.

Факторами, определяющими рабочий процесс импульсного ЛЭМД, являются параметры импульса питающего напряжения (форма и длительность) и начальные условия, задающие характер протекания исследуемого процесса (время и ток трогания). В проводимых исследованиях длительность импульса питающего напряжения ограничена по времени рабочим ходом, что обеспечивает максимальную мощность при передаче энергии ударом. По окончании рабочего хода остаточное магнитное поле ЛЭМД рассеивается в устройстве гашения в виде тепловой энергии, что обеспечивает надежное запирающее действие вентилей [10; 12; 14]. Это снижает КПД, поскольку использование остаточной энергии в последующем цикле для ЛЭМД малой мощности не предусматривается, однако позволяет осуществить построение устройства управления, исходя из требований обеспечения максимальной простоты [150].

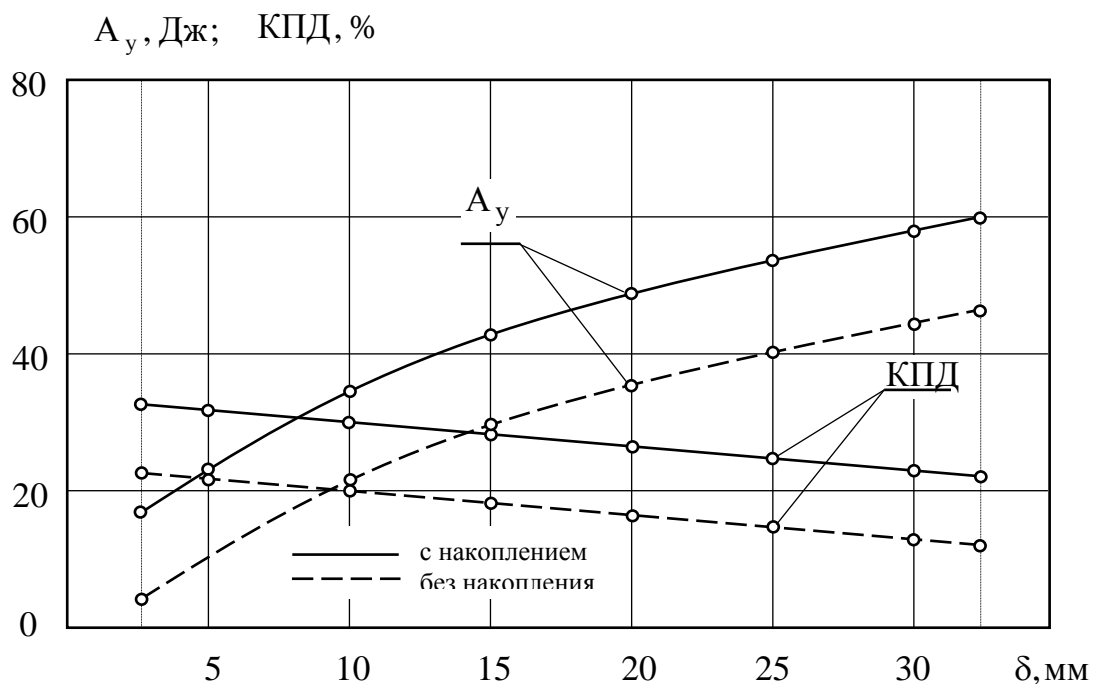


Рис. 5.22. Зависимости максимальной энергии удара A_y и КПД от начального воздушного зазора

В результате расчета рабочих процессов при варьировании времени трогания $t_{\text{тр}}$ и, следовательно, начального уровня энергии, запасаемой в магнитном поле, были получены зависимости для энергии удара $A_{\text{уд}}$, максимальной скорости якоря V_{max} и КПД (рис. 5.23). С ростом $t_{\text{тр}}$ энергия удара и конечная скорость якоря увеличиваются, что наблюдается только в некотором диапазоне времени $t_{\text{тр}}$. Для исследуемого устройства диапазон времени, обеспечивающий увеличение энергии, составляет $t_{\text{тр}} = 0,045 \text{ с}$. Объясняется это тем, что ток в обмотке достигает установившегося значения $i_{\text{тр}}/i_{\text{уст}} = 1$, обеспечивающего максимальное значение начального тягового усилия и среднего значения тока на интервале движения. Время движения и время трогания, соответствующие максимальной энергии, в рассматриваемом случае находятся в следующем соотношении: $t_{\text{тр}} \approx 10 \cdot t_{\text{дв}}$. Установившееся значение энергии удара совпадает с максимумом по КПД (рис. 5.23). Дальнейшее увеличение времени трогания $t_{\text{тр}} > 0,045 \text{ с}$ приводит к снижению КПД при сохранении энергии удара. Объясняется это тем, что при достижении максимальной энергии удара и дальнейшем увеличении времени трогания энергия, запасаемая в магнитном поле, остается постоянной. Энергия, поступающая от источника на данном промежутке времени, расходуется только на поддержание энергии магнитного поля и тепловые потери, что крайне нерационально.

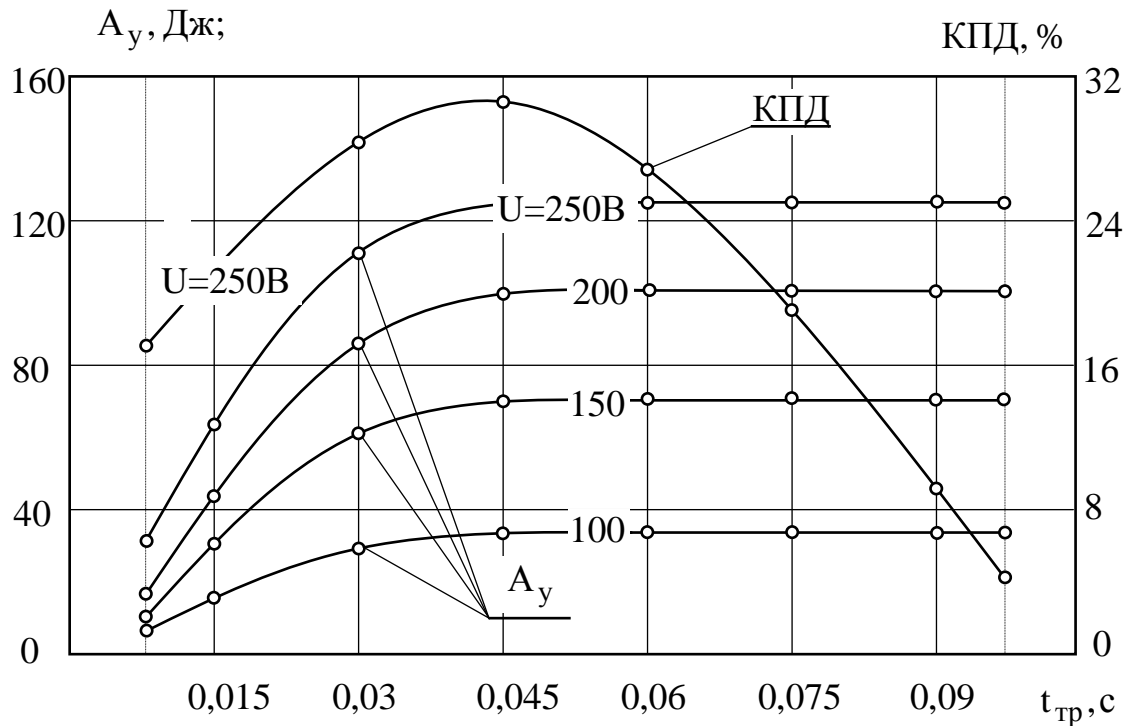


Рис. 5.23. Зависимости энергии A_y удара и при различной длительности удержания якоря $t_{тр}$

В заключение можно сделать вывод, что длительность времени трогания имеет некоторую оптимальную величину, обеспечивающую максимум энергии удара и КПД. Дальнейшее увеличение времени трогания не повышает энергию удара, а приводит лишь к уменьшению КПД при неизменной энергии A_y . В связи с этим выбор времени удержания якоря при совмещении максимума КПД и энергии удара необходимо производить с учетом оптимального времени запасания энергии в магнитном поле при неподвижном якоре. Это время не должно превышать $4...5\tau$ (τ - электромагнитная постоянная времени обмотки).

6. РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД

6.1. ОБОБЩЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД

Расчет параметров и характеристик импульсных ЛЭМД представляет сложную задачу, требующую учета таких факторов, как насыщение стали магнитопровода, силы трения в паразитных зазорах, явления в стали, противодействующие силы нагрузки и т.д.

Из двух известных подходов для построения обобщенных математических моделей однообмоточных импульсных линейных электромагнитных двигателей применим наиболее универсальный метод описания движения электромеханических систем с использованием вариационных принципов на основе уравнений Лагранжа второго рода [290; 291]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = Q_j, \quad j=1,2,\dots,n, \quad (6.1)$$

где T , Π – кинетическая и потенциальная энергия системы; \dot{q}_j , q_j – обобщенные координаты и обобщенные скорости; Q_j – обобщенные силы; n – число степеней свободы системы.

В рамках этого метода возможно рассмотрение математических моделей импульсных ЛЭМД с сосредоточенными и распределенными параметрами магнитной цепи, различной степенью насыщения магнитопроводов, учетом вихревых токов, нагрева и охлаждения. Воспользуемся другой формой уравнений Лагранжа, отличной от (6.1) наличием диссипативной функции D , позволяющей учесть рассеяние механической и электрической энергии в виде потерь на преодоление сил сопротивлений [185]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_j} = Q_j, \quad j=1,2,\dots,n. \quad (6.2)$$

Рассматривая импульсный ЛЭМД как шестиполюсник, имеющий по два электрических, механических и тепловых зажима, считаем, что данная электромеханическая система обладает двумя степенями свободы: одной из них обладает якорь двигателя, второй – его электрическая цепь возбуждения. Примем за обобщенные координаты следующие: q_1 – координату, определяющую положение якоря, q_2 – величину электрического заряда в цепи двигателя, q_3 – среднюю температуру обмотки. Необходимо учесть, что q_1 и q_2 являются независимыми обобщенными координатами, в то время как q_2 и q_3 связаны соотношением:

$$R(\dot{q}_2)^2 - c_1 \dot{q}_3 - c_2 q_3 - c_3 = 0, \quad (6.3)$$

где $R = R(q_3)$ – сопротивление обмотки ЛЭМД; c_1 – коэффициент, характеризующий теплоемкость системы; c_2 – коэффициент, характеризующий теплоотдачу.

В принятых обозначениях уравнения (6.2) примут вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_1} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_1} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_1} = Q_1, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_2} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_2} = Q_2. \end{cases} \quad (6.4)$$

Обобщенными скоростями данной электромеханической системы являются \dot{q}_1 – скорость перемещения якоря и \dot{q}_2 – скорость изменения заряда (тока) в электрической цепи.

Кинетическая энергия системы с учетом инерционных свойств ее элементов и значений обобщенных скоростей может быть представлена выражением:

$$T = \frac{m \dot{q}_1^2}{2} + \int_0^{q_2} \Psi(q_1, \dot{q}_2) dq_2, \quad (6.5)$$

где m – масса подвижной части системы; Ψ – потокосцепление. Потенциальная энергия системы с учетом наличия возвратной пружины с жесткостью z – имеет вид:

$$\Pi = \frac{z(q_0 - q_1)^2}{2} - mgq_1, \quad (6.6)$$

где q_0 – значение q_1 , соответствующее свободному состоянию пружины; g – ускорение свободного падения.

Диссипативную функцию системы можно представить в виде [185]:

$$D = \frac{k_T \dot{q}_1^2}{2} + \frac{R \dot{q}_2^2}{2}, \quad (6.7)$$

где k_T – коэффициент, характеризующий механическое сопротивление (коэф-

фициент трения). Учитывая (6.4) – (6.7), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \ddot{q}_1 - \int_0^{q_2} \frac{\partial \Psi(q_1, q_2)}{\partial q_1} dq_2 - z(q_0 - q_1) - mg + k_T \dot{q}_1 = Q_1, \\ \frac{d\Psi}{dt} + R \dot{q}_2 = Q_2. \end{array} \right. \quad (6.8)$$

Полученные уравнения (6.3) и (6.8) являются обобщенной математической моделью импульсного ЛЭМД.

Запишем их в общепринятых обозначениях [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} E = iR - \frac{d\Psi}{dt}, \\ m \frac{d^2 h}{dt} = F_{\text{Э}} \pm F_{\text{ТР}} - F_{\text{ПР}} + mg - F_C, \\ Ri^2 = c_{\tau} V \frac{d\tau}{dt} + k_T S \cdot \tau, \end{array} \right. \quad (6.9)$$

где i – мгновенное значение тока обмотки ЛЭМД; h – глубина внедрения якоря в обмотку; $F_{\text{Э}}$ – электромагнитная сила; $F_{\text{ТР}}$ – сила трения; $F_{\text{ПР}}$ – сила пружины; F_C – внешние противодействующие силы; c_{τ} – удельная теплоемкость провода обмотки; V – объем обмотки; τ – превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды; S – поверхность охлаждения обмотки.

При учете типа магнитной системы ЛЭМД в уравнениях (6.9) вместо тока будем использовать МДС $F = iw$ – для короткоходовых систем и удельное МДС $f = \frac{iw}{l}$ – для длинноходовых систем, где w , l – число витков и длина обмотки ЛЭМД.

Для учета вихревых токов в уравнениях (6.9) необходимо представить ток в виде суммы, состоящей из вихревого тока i_B и намагничивающего тока i_L [292], или через соответствующие МДС [10].

6.2. РАСЧЕТ СИЛ ОДНОСТОРОННЕГО МАГНИТНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ НЕКОАКСИАЛЬНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЦИЛИНДРОВ

При эксцентричном расположении цилиндрического полюса в круглом отверстии, что характерно для ЛЭМД броневого цилиндрической структуры с втяжным якорем, магнитное поле становится неравномерным и возникает радиальная сила одностороннего притяжения. В связи со значительным влиянием

этой силы на выходные характеристики указанных ЛЭМД актуальным является оценка точности используемых на практике расчетных выражений для ее определения и получение простых и точных формул для данной цели [10, 120]. Для этого проанализируем расчетные формулы сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных ферромагнитных цилиндров, приведенные в работах [80; 145; 166], обозначив их соответственно F_P , F_Γ , F_B :

$$F_P = \frac{\pi\mu_0 h}{\ln^2 \left[1 + a \left(1 + \sqrt{2/a + 1} \right) \right]} \frac{1}{a\sqrt{2/a + 1}} \frac{f^2}{r_1 r_2}, \quad (6.10)$$

$$F_\Gamma = \frac{\pi\mu_0 h r_1}{(r_2 - r_1)^2 - e^2} \frac{1}{(r_2 - r_1)^2 - e^2} f^2, \quad (6.11)$$

$$F_B = \frac{\pi\mu_0 h}{\ln^2 \frac{\xi_1 + \sqrt{\xi_1^2 - 1}}{\eta_1 + \sqrt{\eta_1^2 - 1}}} \frac{\xi_2 \sqrt{\eta_1^2 - 1} - \eta_2 \sqrt{\xi_1^2 - 1}}{\sqrt{\xi_1^2 - 1} \sqrt{\eta_1^2 - 1}} f^2, \quad (6.12)$$

где r_1 , r_2 – радиусы внутреннего и внешнего цилиндров; e – эксцентриситет; h – длина цилиндров; f – удельная МДС обмотки; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; $a = \frac{(r_2 - r_1)^2 - e^2}{2r_1 r_2}$; $\xi_1 = \frac{r_2^2 - r_1^2 - e^2}{2r_1 e}$; $\xi_2 = \frac{r_1^2 - r_2^2 - e^2}{2r_1 e}$;

$$\eta_1 = \frac{r_2^2 - r_1^2 + e^2}{2r_2 e}; \quad \eta_2 = \frac{r_1^2 - r_2^2 + e^2}{2r_2 e}.$$

Авторами [300] правильно указано на ошибку Г.К. Ротерса [145] в окончательном уравнении для определения силы одностороннего притяжения – утеряна степень логарифмической функции. Предложенное авторами в [300] уравнение (6.12), вопреки их утверждениям, не является более общим, чем формула (6.10) Г.К. Ротерса, так как отличается от нее только знаком. В этом нетрудно убедиться, проанализировав формулы (6.10) и (6.12). Так, учитывая, что:

$$\xi_1 = \frac{ar_2 + r_2 - r_1}{e}, \quad \xi_2 = \frac{r_1 \xi_1 + e}{r_1 e}, \quad \eta_1 = \frac{r_1 \xi_1 + e}{r_2}, \quad \eta_2 = -\frac{r_1 \xi_1}{r_1 e}, \quad \eta_1^2 - 1 = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 (\xi_1^2 - 1),$$

имеем:
$$\frac{\xi_1 + \sqrt{\xi_1^2 - 1}}{\eta_1 + \sqrt{\eta_1^2 - 1}} = (\xi_1 + \sqrt{\xi_1^2 - 1}) (\eta_1 - \sqrt{\eta_1^2 - 1}) = 1 + a + \sqrt{2a + a^2},$$

$$\frac{\xi_2 \sqrt{\eta_1^2 - 1} - \eta_2 \sqrt{\xi_1^2 - 1}}{\sqrt{\xi_1^2 - 1} \sqrt{\eta_1^2 - 1}} = -\frac{e}{r_1 r_2 \sqrt{2a + a^2}}.$$

Следовательно, $F_B = -F_P$.

При выводе (6.11) предполагалось, что $a \ll 1, \sqrt{r_1 r_2} \approx r_1$ [166], поэтому, считая формулу Г.К. Ротерса (6.10) точной, оценим погрешность вычисления силы одностороннего притяжения по более простой формуле (6.11). С этой целью рассмотрим отношение:

$$\delta_f = \frac{F_\Gamma}{F_P} \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \sqrt{1 + \frac{a}{2}} \frac{\ln(1 + a + \sqrt{2a + a^2})}{2a}. \quad (6.13)$$

Пренебрегая в (6.13) степенями a выше первой, т.к. у ЛЭМД и электрических машин с катящимся ротором [293] $a \ll 1$, имеем $\delta_f \approx \sqrt{r_1/r_2} (1 + a/12)$.

Обозначая через $\Delta = \frac{r_2 - r_1}{r_1}$ - относительное значение воздушного зазора,

$\varepsilon = \frac{e}{r_1}$ - относительное значение эксцентриситета и учитывая, что

$$a = \frac{\Delta^2 - \varepsilon^2}{2(1 + \Delta)}, \quad \text{запишем} \quad \delta_f = \frac{1 + \frac{\Delta^2 - \varepsilon^2}{24(1 + \Delta)}}{\sqrt{1 + \Delta}}.$$

Отметим, что значения $a \ll 1$ достигаются при достаточно больших Δ . Например, при $\varepsilon = 0,3\Delta$, $\Delta = 0,33$ (это характерно для некоторых типов ЛЭМД) получим $a \ll 0,037$. Таким образом, при оценке δ_f требуется, в первую очередь, учитывать влияние Δ , а затем параметра a . Так как $\varepsilon/\Delta < 1$ (считаем, что ферромагнитные цилиндры не соприкасаются), то при $0 < \Delta < 1$, отбрасывая слагаемые, содержащие степени Δ выше второй, имеем:

$$\delta_f \approx 1 - \frac{\Delta}{2} + \frac{3}{8}\Delta^2 + \frac{\Delta^2 - \varepsilon^2}{24}. \quad (6.14)$$

Следовательно, относительная погрешность при вычислении силы по формуле (6.11) $\left| \frac{F_\Gamma - F_P}{F_P} \right| \leq |\delta_f - 1|$ не превосходит $\Delta/2$.

Если известен магнитный поток Φ в зазоре, то для определения силы одностороннего магнитного притяжения используют одно из следующих выражений [145; 166]:

$$F_P = \frac{\Phi^2}{4\pi\mu_0 h} \frac{1}{\sqrt{2a + a^2}} \frac{e}{r_1 r_2}, \quad (6.15)$$

$$F_\Gamma = \frac{\Phi^2}{4\pi\mu_0 h} \frac{e}{r_1 \sqrt{(r_2 - r_1)^2 - e^2}}. \quad (6.16)$$

Обозначая отношение величин, вычисленных по формулам (6.15), (6.16), $\delta_\Phi = \frac{F_\Gamma}{F_P}$ и переходя к относительным величинам Δ и ε , получим:

$$\delta_{\Phi} = \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta}{2}\right)^2 - \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2}. \quad (6.17)$$

Откуда:

$$\delta_{\Phi} \approx 1 + \frac{\Delta}{2} - \frac{\varepsilon^2}{8}. \quad (6.18)$$

В этом случае, как и в предыдущем, относительная погрешность $\left|\frac{F_{\Gamma} - F_{\text{P}}}{F_{\text{P}}}\right| = |\delta_f - 1|$ также не превосходит $\Delta/2$.

Нетрудно заметить, что погрешности вычисления силы относительного притяжения по формулам (6.11) и (6.16) различны. Из (6.14), (6.18) следует, что расчет силы по (6.11) приводит к занижению, а по формуле (6.16) – к завышению результата. Это объясняется тем, что в выражениях (6.15), (6.16) при вычислении магнитного потока Φ использовались магнитные проводимости

$$G_{\text{P}} = \frac{2\pi\mu_0 h}{\ln(1+a + \sqrt{2a+a^2})} \quad \text{и} \quad G_{\Gamma} = \frac{2\pi\mu_0 h r_1}{\sqrt{(r_2 - r_1)^2 - e^2}} \quad \text{соответственно.}$$

Очевидно, что $\delta_f = (G_{\Gamma} / G_{\text{P}})^2 \delta_{\Phi}$,

$$\text{где } \left(\frac{G_{\Gamma}}{G_{\text{P}}}\right)^2 = \frac{r_1 \ln(1-a - a\sqrt{2a-a^2})}{r_2 \cdot 2a} \approx \frac{1 - \frac{a}{6}}{1 + \Delta} \approx 1 - \Delta + \Delta^2 - \frac{\Delta^2 - \varepsilon^2}{12}.$$

Анализ диапазонов изменения относительной погрешности определения силы одностороннего притяжения по формулам (6.10), (6.11) и (6.15), (6.16) показывает, что при $\frac{\varepsilon}{\Delta} = 0,05 \dots 0,95$ и $\Delta > 0,4$ относительная погрешность превосходит допустимую (15%) при инженерных расчетах.

При более точных расчетах или больших значениях Δ можно рекомендовать вместо формул (6.11) и (6.16) полученные нами соответствующие их модификации

$$F_f = \frac{\pi\mu_0 h \sqrt{r_1 r_2}}{(r_2 - r_1)^2 - e^2} \frac{e}{\sqrt{(r_2 - r_1)^2 - e^2}} f^2, \quad (6.19)$$

$$F_{\Phi} = \frac{\Phi^2}{4\pi\mu_0 h} \frac{2e}{\sqrt{(r_2 - r_1)^2 - e^2} (r_1 + r_2)}. \quad (6.20)$$

Относительные погрешности вычисления по формулам (6.19) и (6.20) следующие:

$$\left|\frac{F_f - F_{\text{P}}}{F_{\text{P}}}\right| \leq \frac{\Delta^2}{24}, \quad \left|\frac{P_{\Phi} - P_{\text{P}}}{P_{\text{P}}}\right| \leq 8.$$

Относительная погрешность по этим формулам не превосходит допустимую при инженерных расчетах во всем диапазоне изменения $\frac{\varepsilon}{\Delta} = 0,05 \dots 0,95$ и $\Delta = 0 \dots 0,8$.

Проведенный анализ расчетных выражений для сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных ферромагнитных цилиндров позволил установить: расчет силы по (6.11) приводит к занижению результата по сравнению с (6.10), расчет силы по (6.16) – к завышению по сравнению с (6.10); относительная погрешность расчета указанной силы по формулам (6.11) и (6.16) не превосходит 50%; при инженерных расчетах силы можно пользоваться формулами (6.11) и (6.16) при $\Delta < 0,3$.

При более точных расчетах ($\Delta > 0,1$) можно рекомендовать полученные формулы (6.19) и (6.20).

Настоящие рекомендации можно использовать и при соответствующих расчетах электрических машин вращательного движения.

6.3. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЛЭМД С ДВУМЯ РАБОЧИМИ ЗАЗОРАМИ, КОМБИНИРОВАННЫМ ЯКОРЕМ И НЕФЕРРОМАГНИТНЫМ НАПРАВЛЯЮЩИМ КОРПУСОМ

Рассматриваемая методика расчета статических характеристик отличается от известных сравнительно простыми расчетными формулами, которые получены в предположении, что при больших воздушных зазорах сталь магнитной системы не насыщена и падением МДС на стальных участках можно пренебречь. Как показали экспериментальные исследования на физических моделях, методика расчета дает вполне удовлетворительные результаты при соотношениях длины рабочего воздушного зазора к диаметру якоря $\frac{\delta}{d} > 0,1$. При выводе формул за основу использован метод расчета магнитных систем броневое типа, рассмотренный в работе [187].

В расчетах приняты следующие допущения: в области рабочих воздушных зазоров учитывается только аксиальная составляющая магнитного потока, а в областях, занятых обмоткой, радиальная составляющая; области рабочих зазоров рассматриваются как участки якоря, отличающиеся от него только магнитной проницаемостью; трубки магнитного потока ограничены линиями или дугами окружностей; магнитным сопротивлением стали по сравнению с сопротивлением воздушных зазоров можно пренебречь.

Расчет распределения магнитного потока производим на участках в последовательности, соответствующей их расположению по длине осевой линии преобразователя, совпадающей с осью z (рис.6.1).

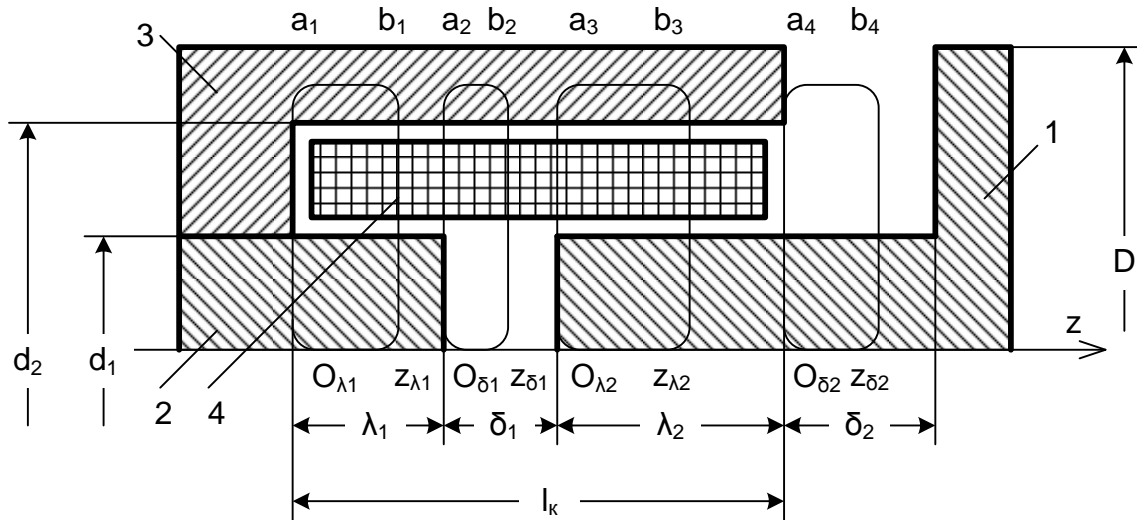


Рис.6.1. Структура электромеханического преобразователя
 1 – якорь; 2 – неподвижный сердечник; 3 – корпус; 4 – обмотка

На первом этапе расчета предположим, что магнитный поток через сечение неподвижного сердечника, нормальное оси системы и проходящее через точку $O_{\lambda 1}$, равен Φ_o . Тогда поток на первом участке через сечение сердечника, отстоящее от точки $O_{\lambda 1}$ на расстояние $z_{\lambda 1}$, равен:

$$\Phi_{z_{\lambda 1}} = \Phi_o - \int_{O_{\lambda 1}}^{z_{\lambda 1}} d\Phi_{z_{\lambda 1}}, \quad (6.21)$$

где $d\Phi_{z_{\lambda 1}}$ – элементарный поток рассеяния между сердечником и корпусом.

Величина элементарного потока рассеяния определяется из уравнения, составленного на основании закона полного тока при обходе контура $z_{\lambda 1} b_1 a_1 O_{\lambda 1} z_{\lambda 1}$. На основании закона полного тока, пренебрегая падением магнитного потенциала в стали, получим:

$$\frac{d\Phi_{z_{\lambda 1}}}{g dz_{\lambda 1}} = \frac{Iw}{l_k} z_{\lambda 1}, \quad (6.22)$$

где $g = \frac{2\pi\mu_0}{\ln(d_2/d_1)}$ – удельная проводимость рассеяния между неподвижным сердечником и корпусом; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $I \cdot w$ – полная МДС обмотки. Выразив значение потока $d\Phi_{z_{\lambda 1}}$ из (6.22) и выполнив подстановку в (6.21), будем иметь:

$$\Phi_{z_{\lambda 1}} = \Phi_o - g \int_{O_{\lambda 1}}^{z_{\lambda 1}} \frac{I_w}{l_k} z_{\lambda 1} dz_{\lambda 1}.$$

После выполнения операции интегрирования получим:

$$\Phi_{z_{\lambda 1}} = \Phi_o - g \frac{I_w}{2l_k} z_{\lambda 1}^2. \quad (6.23)$$

Соответственно, магнитный поток, выходящий из торца неподвижного сердечника и входящий в первый рабочий зазор δ_1 второго участка, равен:

$$\Phi_{\delta 1} = (\Phi_{z_{\lambda 1}})_{z_{\lambda 1}=\lambda_1} = \Phi_o - g \frac{I_w}{2l_k} \lambda_1^2. \quad (6.24)$$

Из соотношений (6.23) и (6.24) после простых преобразований для потока $\Phi_{z_{\lambda 1}}$ получим:

$$\Phi_{z_{\lambda 1}} = \Phi_{\delta 1} + g \frac{I_w}{2l_k} (\lambda_1^2 - z_{\lambda 1}^2). \quad (6.25)$$

По аналогии с уравнением (6.21) магнитный поток через сечение рабочего воздушного зазора δ_1 , нормальное оси и отстоящее от точки $O_{\delta 1}$ на расстоянии $z_{\delta 1}$, равен:

$$\Phi_{z_{\delta 1}} = \Phi_{\delta 1} - \int_{O_{\delta 1}}^{z_{\delta 1}} d\Phi_{z_{\delta 1}}. \quad (6.26)$$

Величина элементарного потока рассеяния $d\Phi_{z_{\delta 1}}$ на втором участке определится из уравнения, составленного по закону полного тока при обходе контура $z_{\delta 1} b_2 a_2 O_{\delta 1} z_{\delta 1}$, имеет вид:

$$\frac{d\Phi_{z_{\delta 1}}}{g dz_{\delta 1}} - U_{O_{\delta 1}} + \int_{O_{\delta 1}}^{z_{\delta 1}} \frac{\Phi_{z_{\delta 1}}}{\mu_0 S_{\delta 1}} dz_{\delta 1} = \frac{I_w}{l_k} z_{\delta 1}, \quad (6.27)$$

где $S_{\delta 1}$ – приведенное сечение воздушного зазора δ_1 ; $U_{O_{\delta 1}}$ – разность магнит-

ных потенциалов между неподвижным сердечником и корпусом в начале рабочего воздушного зазора δ_1 в точке с координатой O_{δ_1} . Дифференцируя уравнение (6.25), получим:

$$U_{O_{\delta_1}} = \left(-\frac{d\Phi_{z\lambda_1}}{gdz_{\lambda_1}} \right)_{z_{\lambda_1}=\lambda_1} = \frac{Iw}{l_k} \lambda_1.$$

Произведя соответствующую подстановку $d\Phi_{z_{\delta_1}}$ из (6.27) в (6.26) и дважды продифференцировав, имеем:

$$\frac{d^2\Phi_{z_{\delta_1}}}{gdz_{\delta_1}^2} - \frac{\Phi_{z_{\delta_1}}}{\mu_0 S_{\delta_1}} = -\frac{Iw}{l_k}. \quad (6.28)$$

Решение неоднородного дифференциального уравнения второго порядка (6.28) будем искать в виде:

$$\Phi_{z_{\delta_1}} = \frac{Iw}{l_k} \mu_0 S_{\delta_1} + c_1 e^{p_1 z_{\delta_1}} + c_2 e^{-p_1 z_{\delta_1}}, \quad (6.29)$$

где $p_1 = \sqrt{g/\mu_0 S_{\delta_1}}$.

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 найдем из условия, что $z_{\delta_1} = 0$:

$$\left(\Phi_{z_{\delta_1}} \right)_{z_{\delta_1}=0} = \Phi_{\delta_1}; \quad \left(\frac{d\Phi_{z_{\delta_1}}}{gdz_{\delta_1}} \right)_{z_{\delta_1}=0} = -U_{O_{\delta_1}},$$

$$\text{тогда } c_1 = 0,5 \left[\Phi_{\delta_1} - \frac{Iw}{l_k} \left(\mu_0 S_{\delta_1} + \frac{g\lambda_1}{p_1} \right) \right] \text{ и } c_2 = 0,5 \left[\Phi_{\delta_1} + \frac{Iw}{l_k} \left(\frac{g\lambda_1}{p_1} - \mu_0 S_{\delta_1} \right) \right].$$

После подстановки c_1 и c_2 в уравнение (6.29) и выполнения простых преобразований с использованием гиперболических функций окончательно получаем:

$$\Phi_{z_{\delta_1}} = \Phi_{\delta_1} \text{ch } p_1 z_{\delta_1} + \frac{Iw}{l_k} \left[\mu_0 S_{\delta_1} (1 - \text{ch } p_1 z_{\delta_1}) - \frac{g\lambda_1}{p_1} \text{sh } p_1 z_{\delta_1} \right].$$

Магнитный поток через сечение якоря, отстоящее от точки O_{λ_2} на расстоянии z_{λ_2} , по аналогии с первыми двумя участками определится как:

$$\Phi_{z_{\lambda 2}} = \Phi_{O_{\lambda 2}} - \int_{O_{\lambda 2}}^{z_{\lambda 2}} d\Phi_{z_{\lambda 2}}, \quad (6.30)$$

где $\Phi_{O_{\lambda 2}}$ - поток, входящий в сечение якоря в точке с координатой $O_{\lambda 2}$.

Из уравнения, составленного по закону полного тока для контура $z_{\lambda 2} b_3 a_3 O_{\lambda 2} z_{\lambda 2}$, имеющего вид:

$$\frac{d\Phi_{z_{\lambda 2}}}{gz_{\lambda 2}} - U_{O_{\lambda 2}} = \frac{Iw}{l_k} z_{\lambda 2},$$

выражаем величину элементарного потока $d\Phi_{z_{\lambda 2}}$:

$$d\Phi_{z_{\lambda 2}} = (U_{O_{\lambda 2}} + \frac{Iw}{l_k} z_{\lambda 2}) g dz_{\lambda 2}. \quad (6.31)$$

После подстановки (6.31) в (6.30) и выполнения операции интегрирования имеем:

$$\Phi_{z_{\lambda 2}} = \Phi_{O_{\lambda 2}} - g U_{O_{\lambda 2}} z_{\lambda 2} - g \frac{Iw}{2l_k} z_{\lambda 2}^2,$$

где $\Phi_{O_{\lambda 2}} = (\Phi_{z_{\delta 1}})_{z_{\delta 1} = \delta 1}$; $U_{O_{\lambda 2}} = \left(-\frac{d\Phi_{z_{\delta 1}}}{gz_{\delta 1}} \right)_{z_{\delta 1} = \delta 1}$.

Определяем: $\Phi_{O_{\lambda 2}} = \Phi_{\delta 1} \operatorname{ch} p_1 \delta_1 + \frac{Iw}{l_k} \left[\mu_0 S_{\delta 1} (1 - \operatorname{ch} p_1 \delta_1) - \frac{g \lambda_1}{p_1} \operatorname{sh} p_1 \delta_1 \right],$

$$U_{O_{\lambda 2}} = -\Phi_{\delta 1} \frac{p}{g} \operatorname{sh} p_1 \delta_1 + \frac{Iw}{l_k} \left[\frac{p_1}{g} \mu_0 S_{\delta 1} \operatorname{sh} p_1 \delta_1 + \lambda_1 \operatorname{ch} p_1 \delta_1 \right].$$

Выполняя аналогичные расчеты для участка магнитной цепи с рабочим воздушным зазором δ_2 , определяем поток в сечении рабочего воздушного зазора δ_2 , нормальном оси и отстоящим от точки $O_{\delta 2}$ на расстоянии $z_{\delta 2}$:

$$\Phi_{z_{\delta 2}} = \frac{Iw}{l_k} \mu_0 S_{\delta 2} + c_3 e^{p_2 z_{\delta 2}} + c_4 e^{-p_2 z_{\delta 2}},$$

где $p_2 = \sqrt{g/\mu_0 S_{\delta 2}}$.

Постоянные интегрирования находим из условия, что при $z_{\delta 2} = 0$:

$$\left(\Phi_{z_{\delta 2}}\right)_{z_{\delta 2}=0} = \Phi_{\delta 2}; \quad \left(\frac{d\Phi_{z_{\delta 2}}}{gdz_{\delta 2}}\right)_{z_{\delta 2}=0} = -U_{O_{\delta 2}},$$

где $U_{O_{\delta 2}}$ – разность магнитных потенциалов между якорем и корпусом в начале рабочего воздушного зазора δ_2 в точке с координатой $O_{\delta 2}$ определяется по формуле:

$$U_{O_{\delta 2}} = \left(-\frac{d\Phi_{z_{\lambda 2}}}{gdz_{\lambda 2}}\right)_{z_{\lambda 2}=\lambda_2} = \frac{Iw}{l_k} \lambda_2.$$

Тогда получим:

$$c_3 = 0,5 \left[\Phi_{\delta 2} - \frac{Iw}{l_k} \left(\mu_0 S_{\delta 2} + \frac{g\lambda_2}{p_2} \right) \right] \quad \text{и} \quad c_4 = 0,5 \left[\Phi_{\delta 2} + \frac{Iw}{l_k} \left(\frac{g\lambda_2}{p_2} - \mu_0 S_{\delta 2} \right) \right].$$

Подставляя соответствующие значения постоянных интегрирования c_3 и c_4 в уравнение (5.44) и выполнив необходимые преобразования, получим:

$$\Phi_{z_{\delta 2}} = \Phi_{\delta 2} \operatorname{ch} p_2 z_{\delta 2} + \frac{Iw}{l_k} \left[\mu_0 S_{\delta 2} (1 - \operatorname{ch} p_2 z_{\delta 2}) - \frac{g\lambda_2}{p_2} \operatorname{sh} p_2 z_{\delta 2} \right], \quad (6.32)$$

где $\Phi_{\delta 2} = \left(\Phi_{z_{\lambda 2}}\right)_{z_{\lambda 2}=\lambda_2} = \Phi_{O_{\lambda 2}} - gU_{O_{\lambda 2}} \lambda_2 - g \frac{Iw}{2l_k} \lambda_2^2$.

На основании уравнения баланса намагничивающих сил системы, полагая, что магнитное сопротивление стали равно нулю, для контура $O_{\lambda 1} z_{\delta 2} b_4 a_1 O_{\lambda 1}$ запишем:

$$\frac{1}{\mu_0 S_{\delta 1}} \int_{O_{\delta 1}}^{\delta 1} \left\{ \Phi_{\delta 1} \operatorname{ch} p_1 z_{\delta 1} + \frac{Iw}{l_k} \left[\mu_0 S_{\delta 1} (1 - \operatorname{ch} p_1 z_{\delta 1}) - \frac{g\lambda_1}{p_1} \operatorname{sh} p_1 z_{\delta 1} \right] \right\} dz_{\delta 1} +$$

$$+ \frac{1}{\mu_0 S_{\delta 2}} \int_{O_{\delta 2}}^{\delta 2} \left\{ \Phi_{\delta 2} \operatorname{ch} p_2 z_{\delta 2} + \frac{Iw}{l_k} \left[\mu_0 S_{\delta 2} (1 - \operatorname{ch} p_2 z_{\delta 2}) - \frac{g\lambda_2}{p_2} \operatorname{sh} p_2 z_{\delta 2} \right] \right\} dz_{\delta 2} = Iw.$$

Подставляя ранее найденные значения потоков, входящих в уравнение

баланса и выполнив операции интегрирования, после ряда преобразований получим выражение для потока Φ_{δ_1} как функцию намагничивающей силы и геометрических размеров. Тяговое усилие, действующее в i -м рабочем зазоре с учетом того, что магнитная система практически линейна, имеет вид:

$$F_i = \frac{\Phi_{\delta_i}^2}{2\mu_0 S_{\delta_i}}$$

Результирующее тяговое усилие всей системы: $F = \sum_{i=1}^m F_i$. Приведенное сечение рабочего воздушного зазора определялось как $S_{\delta_i} = \frac{G_{\delta_i} \delta_i}{\mu_0}$, где

G_{δ_i} – полная проводимость рабочего зазора.

В качестве примера на рис. 6.2 приведено расчетное распределение магнитного потока по длине системы ЛЭМД, имеющего $D = 115$ мм, $d_1 = 67$ мм, $d_2 = 96$ мм, $l_k = 100$ мм, $\lambda_1 = 20$ мм, воздушные зазоры $\delta_1 = 16$ мм, $\delta_2 = 16$ мм, число витков $w = 780$, ток $I = 15$ А.

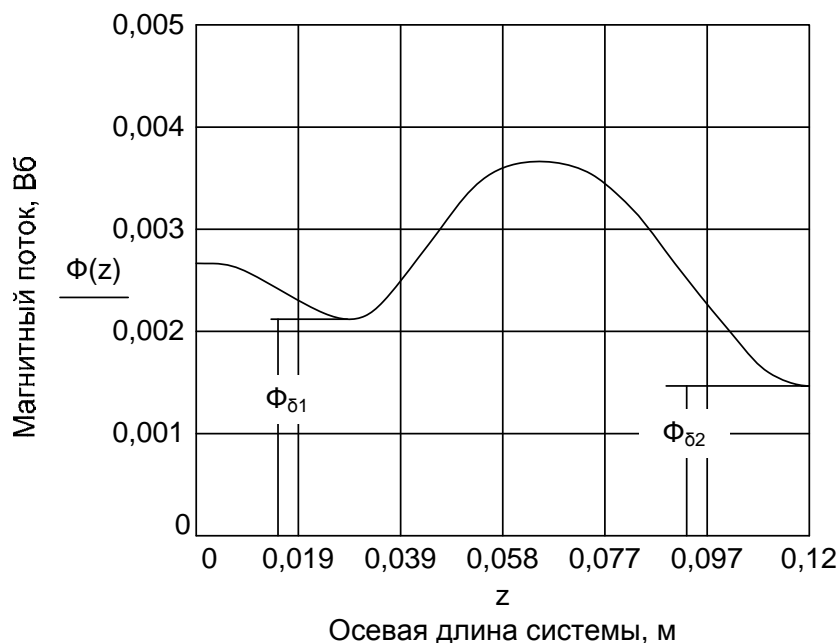


Рис.6.2. График распределения магнитного потока

На рис. 6.3 приведены экспериментальные и расчетные зависимости тяговых характеристик исследуемого преобразователя с двумя рабочими воздушными зазорами.

Реализация расчета по предлагаемой методике выполнена при помощи математической системы Mathcad. При расчете распределения потока (рис. 6.2) применялись средства программирования при помощи операторов иного выбо-

ра otherwise и используемого с ним совместно оператора условных выражений if, встроенного программного модуля системы Mathcad:

$$\phi(z) = \begin{cases} \phi z \lambda 1(z) & \text{if } (0 \leq z < \lambda_1) \\ \phi z \delta 1(z - \lambda_1) & \text{if } (\lambda_1 \leq z < \lambda_1 + \delta_1) \\ \phi z \lambda 2(z - \lambda_1 - \delta_1) & \text{if } (\lambda_1 + \delta_1 \leq z < \lambda_1 + \delta_1 + \lambda_2) \\ \phi z \delta 2(z - \lambda_1 - \delta_1 - \lambda_2) & \text{if } (\lambda_1 + \delta_1 + \lambda_2 \leq z < \lambda_1 + \delta_1 + \lambda_2 + \delta_2) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

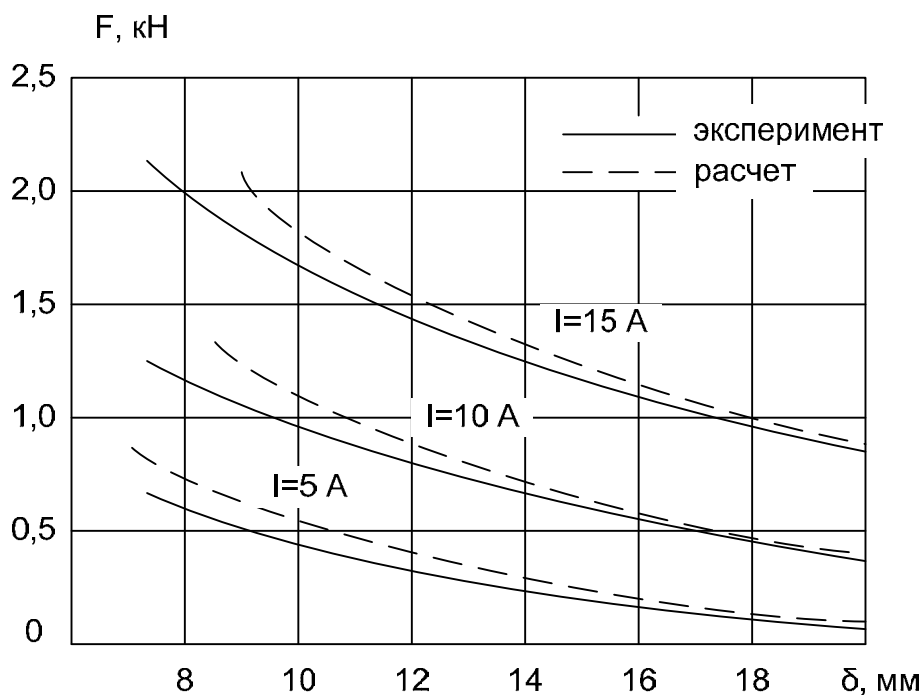


Рис.6.3. Зависимости тягового усилия от величины воздушного рабочего зазора

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что полученные формулы для расчета электромагнитного преобразователя достаточно точно описывают начальный ход тяговой характеристики при относительно больших воздушных зазорах. При дальнейшем уменьшении воздушного зазора погрешность расчета возрастает, что обусловлено необходимостью учета падения магнитного потенциала в стальных участках магнитопровода.

6.4. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЛЭМД С ДВУМЯ РАБОЧИМИ ЗАЗОРАМИ, КОМБИНИРОВАННЫМ ЯКОРЕМ И ФЕРРОМАГНИТНЫМ НАПРАВЛЯЮЩИМ КОРПУСОМ

При расчете магнитной системы ЛЭМД с двумя рабочими зазорами, комбинированным якорем и ферромагнитным направляющим корпусом, выполненным заодно с ярмом (рис. 6.4), используем подход, изложенный в [166]. Представим магнитную систему рассматриваемого двигателя, состоящей из

двух последовательно соединенных магнитных линий с распределенными параметрами, имеющими длину l_1 и l_2 , разделенных нейтралью (сечение А-А) и участка, соответствующего зазору δ_1 , находящемуся внутри обмотки.

Для каждого из участков магнитопровода справедливы дифференциальные уравнения:

$$\frac{\partial \Phi_x}{\partial x} = -gU_x, \quad \frac{\partial U_x}{\partial x} = f - H_x, \quad (6.33)$$

где Φ_x , U_x – магнитный поток и напряжение, соответствующие координате x , отсчитываемой от нейтрали (рис. 6.4) в сторону первого рабочего зазора для первой магнитной линии и в сторону второго рабочего зазора – для второй линии; f – удельная МДС обмотки; $g = 2/\ln(r_2/r_1) = 2/\ln r_1$ – магнитная проводимость потоков рассеяния между якорем и ярмом на единицу длины обмотки; $H_x = H_{1x} + H_{2x}$, где H_{1x} , H_{2x} – напряженности магнитного поля якоря и ярма, соответствующие координате x .

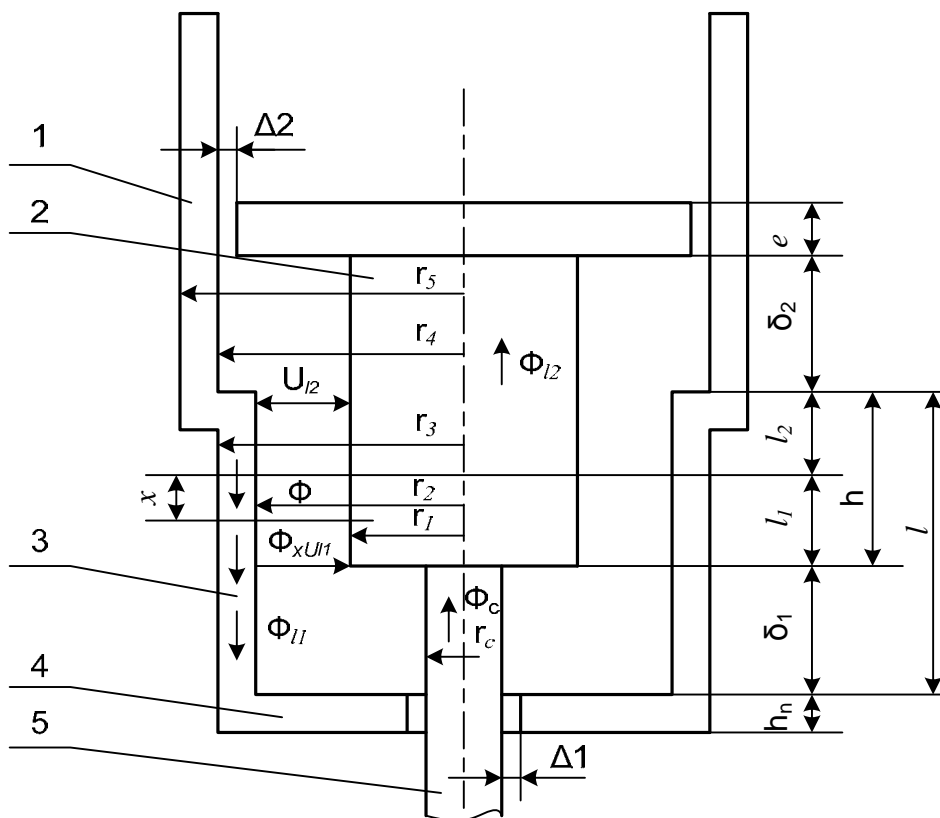


Рис.6.4. Магнитная цепь ЛЭМД с двумя рабочими зазорами, комбинированным якорем и ферромагнитным направляющим корпусом:
 1 – направляющий корпус; 2 – якорь; 3 – ярмо; 4 – фланец;
 5 – направляющий стержень

Особенностью рассматриваемой магнитной системы является то, что при больших ходах ($\delta > r_4 - 1$, $\delta_1 > r - r_c$) магнитное сопротивление рабочих воздушных зазоров значительно превышает магнитное сопротивление нерабочих – «направляющий стержень – нижний фланец» и «стенка направляющего корпуса – дисковая часть якоря». При малых рабочих зазорах ($\delta_1, \delta_2 < r - 1$) наряду с потоками рассеяния между якорем и ярмом существует основной магнитный поток между якорем и нижним фланцем.

И, наконец, в конце хода якоря при зазорах $\delta_1, \delta_2 = 0,02 \dots 0,2$ магнитная цепь двигателя становится сильно насыщенной и потоками рассеяния между якорем и статором можно пренебречь. В соответствии с этим расчет магнитной цепи рассматриваемого ЛЭМД целесообразно проводить для указанных трех диапазонов изменения рабочего зазора: больших, малых и очень малых.

Для вывода формул, справедливых для геометрически подобных ЛЭМД, уравнения (6.33) записаны в относительных величинах. При этом, как и в [180]:

$$\Phi = \Phi_\alpha / \Phi_\delta; \quad U = U_\alpha / U_\delta; \quad f = f_\alpha / f_\delta; \quad l = l_0 / x_\delta; \quad H = H_\alpha / H_\delta; \quad x = x_\alpha / x_\delta; \\ r_2 = r_{2\alpha} / x_\delta \text{ и т.д.,}$$

где $\Phi_\delta = B \cdot \delta \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot d$; $B_\delta = 1 \text{ Тл}$; $U_\delta = H_\delta \cdot r_{1\alpha}$; $f_\delta = H_\delta = B_\delta / \mu_0$;
 $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}$; $x_\delta = r_{1\alpha}$.

Индекс α указывает, что параметры выражены в абсолютных единицах измерения. При больших зазорах и ненасыщенной магнитной системе ЛЭМД $H_x = 0$ и уравнения (6.33) примут вид:

$$\frac{\partial \Phi_x}{\partial x} = -q U_x; \quad \frac{\partial U_x}{\partial x} = f. \quad (6.34)$$

Решая уравнения (6.34), получим:

$$\Phi_x = \Phi_0 - 0,5 \cdot q \cdot x^2 \cdot f, \quad (6.35) \\ U_x = f \cdot x,$$

где Φ_0 - максимальное значение магнитного потока (в нейтрали А - А).

Пренебрегая падением магнитного напряжения ярма, определим магнитное напряжение первого рабочего зазора

$$U_{\delta 1} = f \cdot \delta_1 + U_{\ell 1} \quad (6.36)$$

и магнитный поток направляющего стержня

$$\Phi_c = U_{\delta 1} G_{\Delta 1}, \quad (6.37)$$

где $G_{\Delta 1}$ - относительное значение эквивалентной магнитной проводимости не-рабочего зазора (рис. 6.4); $G_{\Delta 1} = \frac{2 \cdot h \cdot n}{\ln(1 + \Delta_1 / r_c)} + 2,08(r_c + \Delta_1/2)$.

Учитывая (6.35), можно записать для магнитного напряжения в конце первой линии $U_{\ell 1} = f \cdot \ell_1$; $U_{\delta 1} = f(\delta_1 + \ell_1)$. Так как $\ell = h + \delta_1 = \ell_1 + \ell_2 + \delta_1$, то $\ell_1 + \delta_1 = \ell - \ell_2$. Тогда:

$$U_{\delta 1} = f(\ell - \ell_2), \quad (6.38)$$

$$\Phi_c = f(\ell - \ell_2)G_{\Delta 1}. \quad (6.39)$$

Так как магнитный поток в конце первой линии $\Phi_{\ell 1} = U \cdot \delta \cdot G_1$, то учитывая (6.35), получим при $x = \ell_1$:

$$\Phi_0 = f \left[G_1(\ell - \ell_2) + 0,5 \cdot q \cdot \ell_1^2 \right], \quad (6.40)$$

где $G_1 = G_{\delta 1} + G_{\Delta 1}$ - относительное значение эквивалентной магнитной проводимости первого рабочего зазора; $G_{\delta 1}$ - относительное значение магнитной проводимости первого рабочего зазора.

$$G_{\delta 1} = 0,52(r + 1) + 1,28(r - \sqrt{(r - 1)(r - r_c)}) \cdot \ln \frac{r - r_c}{r - 1}.$$

Из (6.40) найдем:

$$f = \frac{\Phi_0}{(\ell - \ell_2) \cdot G_1 + 0,5 \cdot q \cdot G_1^2}. \quad (6.41)$$

Аналогично предыдущему и при тех же предположениях можно записать для области второго рабочего зазора

$$\Phi_{\ell 2} = U_{\ell 2} \cdot G_2, \quad (6.42)$$

где $G_2 = G_{\delta 2} + G_{\Delta 2}$ - относительное значение эквивалентной магнитной проводимости второго рабочего зазора; $G_{\delta 2}$ - относительное значение магнитной проводимости второго рабочего зазора;

$$G_{\delta 2} = 0,52(r + 1) + 1,28(1 + \sqrt{(r - 1)(r_4 - 1)}) \cdot \ln \frac{r_4 - 1}{r - 1};$$

$G_{\Delta 2}$ - относительное значение магнитной проводимости зазора между стенкой направляющего корпуса и дисковой частью якоря (рис. 6.4):

$$G_{\Delta 2} = \frac{2\ell}{\ln \frac{r_4}{r_4 - \Delta_2}} + 2,08(r_4 - 0,5\Delta_2).$$

Учитывая (6.35) и (6.42), можно найти:

$$\Phi_0 = f(\ell_2 G_2 + 0,5 \cdot q \cdot \ell_2^2), \quad (6.43)$$

откуда получим:

$$f = \frac{\Phi_0}{\ell_2 \cdot G_2 + 0,5 \cdot q \cdot \ell_2^2}. \quad (6.44)$$

Из сравнения (6.41) и (6.44) найдем уравнение нейтрали:

$$(\ell - \ell_2)G_1 + 0,5 \cdot g \cdot \ell_1^2 = \ell_2 G_2 + 0,5 \cdot g \cdot \ell_2^2. \quad (6.45)$$

Так как $\ell_1 = h - \ell_2$, то из (6.45) определим:

$$\ell_2 = \frac{\ell \cdot G_1 + 0,5 \cdot g \cdot h^2}{G_1 + G_2 + g \cdot h}. \quad (6.46)$$

Подставляя (6.46) в (6.41) или (6.44), можно рассчитать удельную МДС обмотки ЛЭМД, распределение магнитной индукции вдоль магнитопровода и т.д. Проверка условия ненасыщенности направляющего стержня выполняется после определения ℓ_2 и f (либо Φ_0). Если после их подстановки в (6.39) получим, что $\Phi_C < \Phi_{CH} = B_H \cdot r_C^2$, то стержень ненасыщен (B_H - индукция насыщения стали стержня).

Считая магнитный поток в первом рабочем зазоре постоянным, $\Phi_{\delta 1} = \Phi_{\ell 1}$ и найдем потокосцепление ЛЭМД:

$$\Psi = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} \Phi_x \cdot d_x = \Phi_0 - \frac{1}{\ell} g \left[\frac{1}{3!} (\ell_1^3 + \ell_2^3) + 0,5 \cdot \ell_1^2 \cdot \delta_1 \right]. \quad (6.47)$$

При насыщенном направляющем стержне и ненасыщенных остальных частях магнитопровода ЛЭМД магнитный поток стержня $\Phi_C = \Phi_{CH} = \text{const}$.

Для области первого рабочего зазора можно записать $\Phi_{\ell 1} = \Phi_C + U \delta_1 G_{\delta 1}$; $\Phi_0 = \Phi_C + f[(\ell - \ell_2)G_{\delta 1} + 0,5g\ell_1^2]$, откуда можно найти:

$$f = \frac{\Phi_0 - \Phi_C}{(\ell - \ell_2) \cdot G_{\delta 1} + 0,5 \cdot g \cdot \ell_1^2}. \quad (6.48)$$

Для области второго рабочего зазора остается справедливым уравнение (6.44). Вводя обозначение $n = I - \frac{\Phi_C}{\Phi_0}$, получим уравнение нейтрали для этого случая:

$$0,5g \cdot (1 - n) \cdot \ell_2^2 - (G_{\delta_1} + nG_2 + g \cdot h) \cdot \ell_2 + \ell G_1 + 0,5g \cdot h^2 = 0. \quad (6.49)$$

Решение (6.49) имеет вид:

$$\ell_2 = \frac{G_{\delta_1} + nG_2 + gh - \sqrt{(G_{\delta_1} + nG_2 + gh)^2 - 2(\ell G_1 + 0,5g \cdot h^2) \cdot g(1 - n)}}{g(1 - n)}. \quad (6.50)$$

С помощью ℓ_2 , как и в предыдущем случае, можно определить все необходимые статические характеристики ЛЭМД, включая и потокосцепление по формуле (6.47).

Рассмотрим математическую модель магнитной цепи исследуемого ЛЭМД при средних и малых зазорах, определяемых соотношением $\delta_1, \delta_2 < r - 1$. Примем, что направляющий стержень и корпус насыщены, а ярмо и якорь не насыщены, но степень их насыщения учитывается. В этом случае будут справедливы уравнения (6.33), приближенное решение которых будет иметь вид:

$$\Phi_X = \Phi_0 - \varphi \cdot (0,5g \cdot x^2 + \frac{1}{4!}g^2x^4r_m), \quad U_X = \varphi \cdot (x + \frac{1}{3!}g \cdot x^3 \cdot r_m), \quad (6.51)$$

где $\varphi = f - H$, $r_m = dH/dB$.

Пренебрегая падением магнитного напряжения ярма, запишем для области первого рабочего зазора, как и в предыдущем случае,

$$\Phi_{\ell_1} = \Phi_C + U_{\delta_1}G_{\delta_1} = \Phi_{\delta_1} + \Phi_C.$$

Так как $u_{\ell_1} = \varphi\alpha_1$, то $\Phi_{\ell_1} = \Phi_0 - \varphi \cdot b_1$,

где $\alpha_1 = \ell_1 + \frac{1}{3!}g \cdot \ell_1^3 \cdot r_m$; $b_1 = \frac{1}{2!}g \cdot \ell_1^2 + \frac{1}{4!}g^2 \cdot \ell_1^4 \cdot r_m$.

Тогда $\Phi_0 - \varphi b_1 - \Phi_C = (\varphi \cdot \alpha_1 + f \cdot b_1)$ или

$$\Phi_0 - \varphi \cdot (b_1 + \alpha_1 G_1 \delta_1) - \Phi_C - f \delta_1 G \delta_1 = 0, \quad (6.52)$$

где $G_{\delta_1} = \frac{1 - r_c^2}{\delta_1} + 1,04$.

Для области второго рабочего зазора при насыщенном направляющем корпусе будут справедливы следующие соотношения: $\Phi_{\ell_2} = \Phi_{\delta_2} + \Phi_{\Delta_2}$, $\Phi_{\delta_2} = U_{\ell_2} G_{\delta_2}$. Так как $u_{\ell_2} = \varphi \alpha_2$, то $\Phi_{\ell_2} = \Phi_0 - \varphi \cdot b_2$,

$$\text{где } \alpha_2 = \ell_2 + \frac{1}{3!} g \cdot \ell_2^3 \cdot r_m ; \quad b_2 = \frac{1}{2!} g \cdot \ell_2^2 + \frac{1}{4!} g^2 \cdot \ell_2^4 \cdot r_m ;$$

$$G_{\delta_2} = \frac{(r_4 - \Delta_2)^2 - r^2}{\delta_2} + 1,04 \cdot r + 2,56 \cdot (r - \sqrt{\delta_2(r-1)}) \cdot \frac{r-1-\delta_2}{r+\delta_2-1}.$$

Тогда получим:

$$\Phi_0 - \varphi \cdot b_2 = \varphi \alpha_2 \cdot G_{\delta_2} + \Phi_{\Delta_2}. \quad (6.53)$$

Так как направляющий ферромагнитный корпус насыщен, то можно считать, что $\Phi_{\Delta_2} = \Phi_K = B_H S_K / S_Y = B_H (r_5^2 - r_4^2) = const$, где S_K , S_Y - сечение кожуха и якоря соответственно.

Следовательно,

$$\Phi_0 - \varphi \cdot (b_2 + \alpha_2 \cdot G_{\delta_2}) - \Phi_K = 0. \quad (6.54)$$

Уравнения (6.52) и (6.54) образуют систему нелинейных уравнений с неизвестными ℓ_2 , f (или φ), которая может быть решена только численно. Для этого требуется иметь нулевое приближение.

Так как $f = \varphi + H$, то из (6.52) найдем:

$$\varphi = \frac{\Phi_0 - H_{\delta_1} G_{\delta_1} - \Phi_C}{b_1 + \alpha_1 G_{\delta_1} + \delta_1 G_1}. \quad (6.55)$$

Из (6.54) имеем:

$$\varphi = \frac{\Phi_0 - \Phi_K}{b_2 + \alpha_2 G_{\delta_2}}. \quad (6.56)$$

Сравнивая (6.55) и (6.56), получим уравнение нейтрали

$$n \cdot (b_2 + \alpha_2 G_{\delta_2}) = b_1 + G_{\delta_1} (\alpha_1 + \delta_1), \quad (6.57)$$

$$\text{где } n = 1 - \frac{\Phi_C - \Phi_K + H_{\delta_1} G_{\delta_1}}{\Phi_0 - \Phi_K}.$$

Приближенное (нулевое) решение уравнения (6.57) получим при $r_m = 0$ (пренебрегая насыщением ярма и якоря):

$$(1-n) \frac{1}{2} g \cdot \ell_2^2 - (G_{\delta_1} + n G_{\delta_2} + g \cdot h) \cdot \ell_2^2 + \frac{1}{2} g \cdot h^2 + G_{\delta_1} \cdot (h + \delta_1) = 0. \quad (6.58)$$

Решая (6.58), найдем ℓ_2^0 в виде (6.50), а также $\ell_1^0 = h - \ell_2^0$;

$$\varphi^0 = (\Phi_0 - \Phi_K) / (b_2^0 + \alpha_2 G_{\delta 2}); \quad f^0 = \varphi^0 + H.$$

С учетом (6.51) получим потокосцепление ЛЭМД:

$$\psi = \Phi_0 - (1/\ell)\varphi(C_1 + C_2 + b_1\delta_1), \quad (6.59)$$

где $C_1 = \frac{1}{3!}g \cdot \ell_1^3 + \frac{1}{5!}g^2 \cdot \ell_1^5 \cdot r_m$; $C_2 = \frac{1}{3!}g \cdot \ell_2^3 + \frac{1}{5!}g \cdot \ell_2^5 \cdot r_m$.

При очень малых зазорах магнитная цепь исследуемого ЛЭМД может рассматриваться как последовательная, так как из-за сильного насыщения потоками рассеяния между якорем и статором можно пренебречь. Исходя из схемы замещения последовательной магнитной цепи ЛЭМД с сосредоточенными параметрами можно записать выражение для потокосцепления:

$$\psi = \frac{I_\tau W^2}{\ell_{\text{ср.м}} / \mu + 2\delta}, \quad (6.60)$$

где I_τ - установившееся значение тока двигателя, соответствующее температуре перегрева τ ; $\ell_{\text{ср.м}}$ - длина средней магнитной линии; μ - среднее значение относительной магнитной проницаемости магнитопровода, соответствующее заданной индукции B_K в стали; δ - рабочий зазор.

Выразив величины, входящие в (6.60), через базисный размер - радиус втяжной части якоря ЛЭМД и его геометрические параметры, получим $\delta = r_1 \bar{\delta}$, где $\bar{\delta}$ - относительный рабочий зазор; $\ell_{\text{ср.м}} = r_1 (2y + x + 1 + \sqrt{x^2 + 1})$.

Исходя из связи индукции в стали со значением μ через напряженность магнитного поля и воспользовавшись аппроксимацией кривой намагничивания в виде полинома $H = \alpha \bar{B} + \beta \bar{B}^5 + \xi \bar{B}^9$, выразим относительную магнитную проницаемость стали, как отношение напряженностей магнитного поля $H_{\text{ок}}$ и $H_{\text{ст.к}}$, обеспечивающих одну и ту же индукцию в рабочем зазоре и стали:

$$\mu = \frac{H_{\text{ок}}}{H_{\text{ст.к}}} = \frac{B_B}{\mu_0 (\alpha + \beta \bar{B}_K^4 + \xi \bar{B}_K^8)}, \quad (6.61)$$

где $\bar{B}_K = B_K / B_B$ - относительное значение индукции, соответствующее максимально допустимой МДС при конечном зазоре; $B_B = 1$ Тл - базисное значение индукции; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

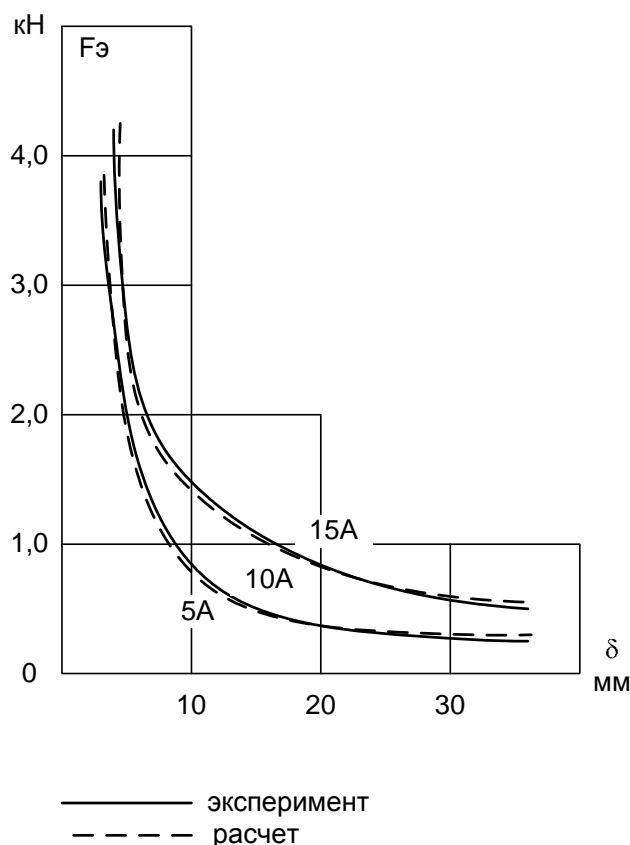


Рис. 6.5. Зависимость силы тяги от величины тока и рабочего зазора ЛЭМД

Используя уравнение теплового баланса Ньютона-Рихмана [166], определим максимально допустимый относительный ток с учетом продолжительности включения ПВ

$$I_{\tau} = \sqrt{k_T k_{3M} \tau S_{\text{охл}} S_{\text{ок}} / (\text{ПВ} \rho_{\tau} \ell_{\text{ср}})} / (w I_{\delta}), \quad (6.62)$$

где k_{3M} , k_T - коэффициенты заполнения и теплоотдачи обмотки; $S_{\text{охл}}$, $S_{\text{ок}}$ - поверхность охлаждения ЛЭМД и сечение окна катушки; ρ_{τ} - удельное сопротивление материала провода при превышении температуры τ ; $\ell_{\text{ср}}$ - средняя длина витка; $I_{\delta} = 2y r_1 B_{\delta} / (w \mu_0)$ - базисный ток.

Выразим $S_{\text{охл}}$, $S_{\text{ок}}$, $\ell_{\text{ср}}$ через геометрические размеры ЛЭМД (рис. 6.5)

$$S_{\text{охл}} = 2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot \alpha' \cdot [y(x+1) + x^2 - 1]; \quad S_{\text{ок}} = r_1^2 y(x-1); \quad (6.63)$$

$$\ell_{\text{ср}} = \pi \cdot r_1 (x+1),$$

где α' - эмпирический коэффициент, учитывающий условия теплоотдачи.

Подставляя в (6.60) выражения (6.62), (6.63) с учетом (6.61), получим:

$$\psi = \frac{\alpha_1 b_1 y \sqrt{r_1} B_\delta}{(2y + x + 1 + \sqrt{x^2 + 1}) \mu_0 (\alpha + \beta \bar{B}_K^4 + \xi \bar{B}_K^8) + 2r_1 \delta \bar{B}_B}, \quad (6.64)$$

где $\alpha_1 = \sqrt{2k_T k_{3M} \tau \alpha' / \text{ПВ} \rho_\tau}$; $b_1 = \sqrt{(x-1)[1 + (x-1)/y]}$.

Выражение (6.64) представляет собой математическую модель магнитной цепи ЛЭМД с комбинированным якорем, двумя рабочими зазорами при очень малых зазорах ($\delta/\ell_0 = 0,001 \dots 0,003$). Оно справедливо и для подобных двигателей с укороченной магнитной системой при относительном рабочем ходе $\delta = 0,02 \dots 0,2$ [71].

Полученные выражения позволяют определить статические тяговые характеристики исследуемых ЛЭМД во всех рассматриваемых диапазонах изменения рабочего зазора. Знание статистических тяговых характеристик ЛЭМД необходимо для определения их работоспособности, расчета конструктивных параметров, динамических характеристик.

Воспользуемся энергетической формулой [166] для расчета статического тягового усилия ЛЭМД $F_\delta = -\int_0^i (d\psi / d\delta) di$, которая может быть представлена через ранее полученные соотношения в виде $F_\delta = -\int_0^f (d\psi / dh) df$.

Для ЛЭМД при больших зазорах с ненасыщенным направляющим стержнем, используя выражения (6.44), (6.47) и проведя необходимые преобразования, получим:

$$F_\delta = 0,5 \cdot c \cdot f^2, \quad (6.65)$$

где $c = a + b$;

$$a = \frac{(G_2 + g \cdot \ell_2) \cdot \frac{d\ell_2}{dh} + \ell_2 \frac{dG_2}{dh}}{\ell_2 \cdot G_2 + 0,5 \cdot g \cdot \ell_2^2} \left[\frac{1}{3!} \cdot (\ell_1^3 + \ell_2^3) + 0,5 \cdot \ell_1^2 \cdot \delta \right];$$

$$b = - \left[(\ell_1 \delta + 0,5 \cdot h^2 - \ell \cdot \ell_1) \frac{d\ell_2}{dh} \right].$$

Для ЛЭМД при больших зазорах с насыщенными направляющим стержнем аналогичным путем найдем:

$$F_\delta = 0,5 \cdot g \cdot \lambda \cdot f^2 / \ell,$$

где

$\lambda =$

$$\left\{ \frac{\ell_2 \frac{dG_2}{dh} (G_2 + g \cdot \ell_2) \frac{d\ell_2}{dh}}{\ell_2 G_2 + 0,5 \cdot g \cdot \ell_2^2} \left[\frac{1}{3!} (\ell_1^3 + \ell_2^3) + 0,5 \cdot \ell_1^2 \cdot \delta \right] + (\ell \cdot \ell_1 - 0,5 \cdot h^2) \frac{d\ell_2}{dh} - \ell_1 \delta \right\}.$$

Для ЛЭМД при малых зазорах тяговое усилие можно представить в виде суммы трех составляющих [10]:

$$F = F_1 + F_2 + F_3, \quad (6.67)$$

$$\text{где } F_1 = -0,5\varphi^2 d_1^2 (dG/d\delta); \quad F_2 = -0,5\varphi^2 d_2^2 (dG_2/d\delta); \quad F_3 = f \cdot \varphi \cdot b_1.$$

Для ЛЭМД при очень малых зазорах, используя формулу Максвелла для тягового усилия в виде $F_{\mathcal{G}} = (I_{\tau} w)^2 \pi \cdot r_1^2 \cdot \mu_0 / \ell_{\text{ср.м}} / (\mu + 2\delta)^2$ и полученные выражения для μ , $\ell_{\text{ср.м}}$, δ , I_{τ} окончательно найдем:

$$F_{\mathcal{G}} = \frac{a_1 \cdot b_1^2 y^2 \cdot r_1^3 \cdot \pi \cdot \mu_0}{\left[\frac{(2y + x + 1 + \sqrt{x^2 + 1}) \mu_0 (\alpha + \beta \bar{B}_K^4 + \xi \bar{B}_K^8)}{B_{\delta}} + 2\bar{\delta} \right]^2}. \quad (6.68)$$

С помощью полученных выражений были рассчитаны тяговые характеристики ряда ЛЭМД для различных значений тока. При этом базисное значение силы тяги $F_{\delta} = \pi / \mu_0 (B_{\delta} r_1)^2$.

На рис. 6.6 приведено семейство кривых для ЛЭМД без стопа с параметрами:

$$\begin{aligned} \ell_0 &= 82 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad w = 1063; \\ r_1 &= 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad r_2 = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ r_3 &= 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ r_4 &= 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad r_c = 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \end{aligned}$$

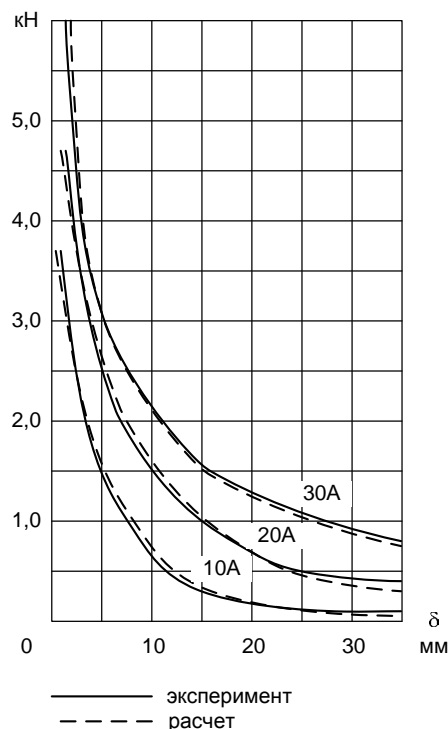


Рис. 6.6. Зависимость силы тяги от величины тока и рабочего зазора ЛЭМД

Магнитопроводы ЛЭМД были изготовлены из стали марки Ст. 3. Экспериментальные зависимости силы тяги были сняты по методике, описанной в [294]. Максимальная погрешность расчета тягового усилия не превышает 15%.

6.5. ОЦЕНКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАШИН С ЛЭМД ИЗ УСЛОВИЙ ДОПУСТИМОГО НАГРЕВА ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Из всего многообразия электромагнитных ударных машин самое широкое применение в импульсных технологиях получили молотки, перфораторы, сейсмоисточники, прессовое оборудование и молоты. Для этих машин характерны высокие значения отношений мощности потерь к полезной мощности (ударной мощности), составляющие 1,2...5,5. Это обусловлено низкими значениями КПД данных устройств, не превышающих 0,46, при наиболее часто встречающихся 0,25...0,38 [63]. Данное обстоятельство вынуждает разработчиков электромагнитных ударных машин прибегать к интенсивным способам охлаждения (воздушному охлаждению молотков и перфораторов, водяному охлаждению некоторых молотов), чтобы обеспечить высокую производительность.

Практическая реализация интенсивных способов охлаждения связана с необходимостью использования дополнительного электродвигателя (молотки, перфораторы) либо с усложнением конструкции машины и снижением ее надежности (молоты с водяным охлаждением). Естественно, при этом теряется

одно из основных преимуществ электромагнитных ударных машин – конструктивная простота.

Из анализа реализованных на практике конструкций машин с импульсными ЛЭМД следует значительное различие их технико-экономических показателей даже в случае выполнения одинаковых технологических операций с одинаковыми значениями усилий и частотой хода. При этом чаще всего приводимые в литературе технические характеристики представлены без учета процессов, связанных с условиями нагрева.

Поэтому актуальной является задача по определению приближенными методами из условия допустимого нагрева по известным из опыта или рассчитанными параметрами энергии удара и частоты ударов в продолжительном режиме работы, а также времени работы с заданной частотой для кратковременного и повторно-кратковременного режимов электромагнитных ударных машин с естественным охлаждением. Решение этой задачи позволяет, не производя сложных трудоемких тепловых расчетов, ориентировочно рассчитать указанные параметры и оценить их технические возможности.

При решении поставленной задачи в качестве примера использованы технические показатели электромагнитных ударных машин (табл. 6.1), определенные экспериментальным путем [10; 12; 28; 98; 177]. Выходные параметры (энергия, частота ударов) представленных машин можно регулировать в широких пределах. Указанные в табл. 6.1 энергия и частота ударов соответствуют одному из рассматриваемых режимов.

Все электромагнитные ударные машины по величине энергии единичного удара разделены на две группы. К первой отнесены машины с энергией удара до 500 Дж (пресс-молоты), ко второй – машины с энергией удара более 500 Дж (к ней относятся тяжелые электромагнитные молоты). Такое разбиение связано с удобством графического представления характеристик ударных машин с широким диапазоном значений энергии ударов.

При выводе уравнений приняты допущения одномерности температурного поля обмотки машины и независимости теплофизических параметров обмотки и принятого коэффициента теплоотдачи с поверхности ($k_T = 12 \text{ Вт/м}^2\text{град}$) от нагрева [178]. Правомерность принятых допущений определяется поставленными целями оценки режимов.

Расчет выходных параметров выполнен при одинаковых условиях, соответствующих температуре окружающей среды ($\tau_{ок} = 20^\circ \text{C}$) и допустимой по нагреву температуре изоляции класса F обмоточного провода ($\tau_{ок} = 155^\circ \text{C}$). Учет теплоотдачи производится с наиболее развитой боковой поверхности.

Таблица 6.1

Характеристики созданных линейных электромагнитных машин

№ п\п	Тип машин	Энергия удара А, Дж	КПД η , %	Частота ударов n , уд/мин	Длина двигателя L, м	Диаметр двигателя D, м	Масса двигателя М, кг
Пресс-молоты							
1	ПЭМ-0,1	3,0	30	360	0,062	0,06	1,3
2	ПЭМ-0,2	5,0	30	300	0,068	0,074	2,5
3	ПЭМ-0,3	7,0	31	300	0,087	0,084	3,9
4	ПЭМ-0,5	12	27	250	0,096	0,102	6,0
5	ПЭМ-0,8	17	25	250	0,108	0,105	10
6	ПЭМ-1,0	20	25	200	0,120	0,120	11
7	ПЭМ-3,0Д	250	40	120	0,205	0,220	64
Молоты							
8	ЭМ	400	40	400	0,205	0,222	80
9	МЭМ-180	1800	24	90	1,50	0,260	485
10	МЭМ-600	6000	28	90	1,20	0,530	1900
11	МЭМ-1000	10000	29	75	2,19	0,446	2200
12	МЭМ-3000	30000	36	80	2,72	0,560	4700
13	МЭМ-10000	100000	25	24	2,40	0,976	14300

Рабочий процесс рассматриваемых режимов представим как последовательность рабочих циклов без пауз между ними. Под длительностью времени рабочего цикла условимся понимать сумму интервалов времени для совершения рабочего хода якоря (бойка) и времени для возврата его в исходное положение. Рабочий процесс будет характеризоваться чередующимися интервалами времени нагрева t_p и охлаждения $t_{\text{п}}$. Типичная кривая циклического процесса нагрева изображена на рис. 6.7. Тепло, выделяемое двигателем при работе, частично отдается в окружающее пространство, а частично идет на повышение его температуры.

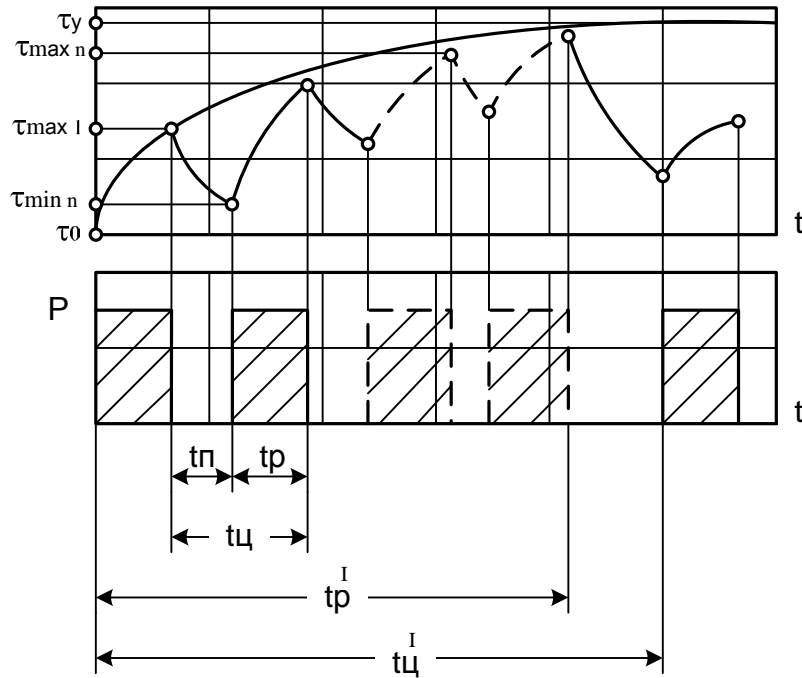


Рис. 6.7. Кривая циклического процесса нагрева

Записывая шаг за шагом перегрев в конце каждого цикла [179], по закону Ньютона [126], определяющего зависимость температуры от времени в процессе нагрева при отдаче тепла в окружающую среду, получим:

$$\tau_{\text{НАГ}} = \tau_0 \exp\left(-\frac{t_p}{T_0}\right) + \tau_y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T_0}\right)\right], \quad (6.69)$$

где $\tau_{\text{НАГ}}$ - температура нагрева; τ_0 , τ_y - соответственно начальное и установившееся значение температуры при длительном процессе выделения мощности за время t_p ; T_0 - постоянная времени нагрева обмотки. Тогда в период бес-токовой паузы $t_{\text{П}}$ при охлаждении будем иметь:

$$\tau_{\text{ОХЛ}} = \tau_{\text{НАГ}} \exp\left(-\frac{t_{\text{П}}}{T_0}\right). \quad (6.70)$$

Используя уравнения (6.69) и (6.70) и выражая каждый последующий перегрев через предыдущий, получим для первого цикла при начальных условиях, соответствующих температуре окружающей среды $\tau_0 = 0$, превышение температуры:

$$\tau_{\max 1} = \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right]. \quad (6.71)$$

За время первой паузы произойдет охлаждение до температуры:

$$\tau_{\min 1} = \tau_{\max 1} \exp\left(-\frac{t_{\Pi}}{T_0}\right). \quad (6.72)$$

Решая совместно (6.71) и (6.72), получаем:

$$\tau_{\min 1} = \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] \exp\left(-\frac{t_{\Pi}}{T_0}\right).$$

Во втором цикле, при повторном срабатывании, нагрев обмотки начнется при начальных условиях $\tau_0 = \tau_{\min 1}$, и за время t_P температура обмотки станет выше температуры окружающей среды и равной:

$$\begin{aligned} \tau_{\max 2} &= \tau_{\min 1} \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) + \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] \exp\left(-\frac{t_{\Pi}}{T_0}\right) = \\ &= \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] + \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] \exp\left(-\frac{t_{\Pi}}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right), \end{aligned}$$

а за время t_{Π} второй паузы произойдет охлаждение до температуры:

$$\tau_{\min 2} = \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] \exp\left(-\frac{t_{\Pi}}{T_0}\right) + \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] \exp\left(-\frac{t_{\Pi}}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{t_{\Pi}}{T_0}\right).$$

Для третьего цикла (при начальных условиях $\tau_0 = \tau_{\min 2}$):

$$\tau_{\max 3} = \tau_{\min 2} \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) + \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] \exp\left(-\frac{t_{\Pi}}{T_0}\right) = \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] \exp\left(-\frac{t_{II}}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) + \\
& + \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] \exp\left(-\frac{t_{II}}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{t_{II}}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right); \\
& \tau_{\min 3} = \tau_{\max 2} \exp\left(-\frac{t_{II}}{T_0}\right) \text{ и т.д.}
\end{aligned}$$

Для n -го цикла при достаточно большом числе срабатываний температура перегрева определится по выражению:

$$\begin{aligned}
\tau_{\max n} = \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] * \\
* \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{II}}{T_0}\right) + \exp\left(-\frac{2t_{II}}{T_0}\right) + \dots + \exp\left(-\frac{(n-1)t_{II}}{T_0}\right) \right], \quad (6.73)
\end{aligned}$$

где n – количество полных циклов; $t_{II} = t_p + t_n$ – длительность цикла.

После преобразований (6.73) может быть представлено в виде

$$\tau_{\max n} = \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_P}{T_0}\right) \right] \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{n t_{II}}{T_0}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_{II}}{T_0}\right)}, \quad (6.74)$$

где $\tau_{\max n}$ – максимальный перегрев в конце n -го цикла; τ_Y – установившееся превышение температуры при длительном процессе выделения мощности; n – количество учтенных полных рабочих циклов.

С учетом влияния отдачи тепла элементам конструкции двигателя, постоянная времени нагрева обмотки определяется известным приближенным выражением [166], в котором используется соотношение $m_M / M = k$, где M – общая масса двигателя; m_M – масса меди обмотки.

Расчетное выражение для определения постоянной времени имеет вид:

$$T_0 = \frac{M[c_M k + \beta c_{CT}(1-k)]}{k_T S_n},$$

где c_M , c_{CT} - удельная теплоемкость обмоточной меди и стали; $S_{II} = \pi DL$ - поверхность охлаждения, связанная с линейными размерами (диаметром D и длиной двигателя L); $\beta=0,225\dots0,55$ – коэффициент, зависящий от времени включения обмотки и условий передачи тепла от обмотки к стали. В расчетах принято среднее значение $\beta = 0,39$.

Анализ конструкций ударных машин, большинство из которых имеет броневую цилиндрическую магнитную систему двигателя, показывает, что для практических расчетов можно принять значение k , равное $0,15\dots0,25$, при этом ошибка в определении постоянной нагрева не превышает 8,5%.

На основании уравнения (6.74) для кратковременного режима определим время работы электромагнитной ударной машины при заданной частоте и энергии удара. Условием, ограничивающим продолжительность работы в рассматриваемом режиме, является допустимая температура перегрева двигателя, при достижении которой его необходимо отключить и охладить до температуры окружающей среды.

Предварительно обозначив $n = n_{\max}$, из уравнения (6.74) определим максимальное количество последовательных рабочих циклов (количество ударов) электромагнитной ударной машины до выхода ее на предельно допустимую по нагреву температуру:

$$n_{\max} = \frac{T_0}{t_{II}} \ln \left\{ 1 - \frac{\tau_{\max n}}{\tau_Y} \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{t_{II}}{T_0}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T_0}\right)} \right] \right\}^{-1}. \quad (6.75)$$

Отношение $\tau_{\max n} / \tau_Y$ в уравнении (6.75), согласно [166], характеризует величину, обратно пропорциональную коэффициенту перегрузки k_p , который также можно выразить через длительно допустимую мощность потерь ΔP_D , мощность потерь за импульс ΔP_p и время t_p :

$$\frac{1}{k_p} = \frac{\tau_{\max n}}{\tau_Y} = \frac{\Delta P_D}{\Delta P_p}. \quad (6.76)$$

Длительно допустимая мощность потерь рассчитывается с помощью уравнения теплового баланса и определяется выражением

$$\Delta P_{\text{д}} = k_{\text{T}}(T_0 - \tau_{\text{ок}})S_{\text{п}}. \quad (6.77)$$

Мощность потерь за время t_p определим через энергию W , потребляемую двигателем за один рабочий импульс тока, и КПД:

$$\Delta P_{\text{п}} = \frac{W}{t_p}(1 - \eta),$$

где η - КПД двигателя.

Выражая связь между энергией удара A_y и потребляемой энергией W за импульс тока соотношением $A_y = W\eta$, представим мощность потерь как функцию, зависящую от энергии удара:

$$\Delta P_{\text{п}} = \frac{A_y(1 - \eta)}{t_p\eta}. \quad (6.78)$$

Выполнив подстановку (6.77) и (6.78) в (6.76), получим выражение для определения коэффициента перегрузки:

$$k_{\text{п}} = \frac{\tau_{\text{Y}}}{\tau_{\text{max n}}} = \frac{k_0 A_y(1 - \eta)}{t_p\eta}, \quad (6.79)$$

где $k_0 = 1/k_{\text{T}}(T_0 - \tau_{\text{ок}})S_{\text{п}}$ - величина обратно пропорциональная мощности потерь $\Delta P_{\text{д}}$.

С учетом (1.11) выражение (6.75), определяющее связь между энергией ударов и максимальным количеством последовательных рабочих циклов (ударов), принимает вид:

$$n_{\text{max}} = \frac{T_0}{t_{\text{ц}}} \ln \left\{ 1 - \frac{t_p\eta}{k_0 A_y(1 - \eta)} \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{ц}}}{T_0}\right) \right]}{\left[1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T_0}\right) \right]} \right\}^{-1}. \quad (6.80)$$

При условии, что $t_{\text{ц}} \ll T_0$ и $\exp(-x) \sim 1 - x$, выражение (6.80) примет вид:

$$n_{\max} = \frac{T_0}{t_{\text{ц}}} \ln \left[1 - \frac{t_{\text{ц}} \eta}{k_0 A_y (1 - \eta)} \right]^{-1}. \quad (6.81)$$

С учетом строгой последовательности рабочих циклов продолжительность работы можно определить как $t_{\max} = t_{\text{ц}} n_{\max}$, тогда из (6.81) можно получить выражение для максимальной продолжительности работы:

$$t_{\max} = T_0 \ln \left[1 - \frac{60\eta}{k_0 \eta A_y (1 - \eta)} \right]^{-1}, \quad (6.82)$$

где $n = 60/t_{\text{ц}}$ - частота ударов в минуту.

Выражение (6.82) позволяет в первом приближении оценить продолжительность работы электромагнитных ударных машин в кратковременном режиме с учетом нагрева.

На рис. 6.8 по выражению (6.82) построены зависимости максимальной продолжительности работы от величины энергии единичного удара прессомолота ПЭМ-1,0 для двух значений допустимой температуры нагрева обмотки. Из графиков (1 – расчет, 2 – эксперимент) видно, что продолжительность работы определяется энергией удара, причем с увеличением энергии удара максимальное время продолжительности работы снижается.

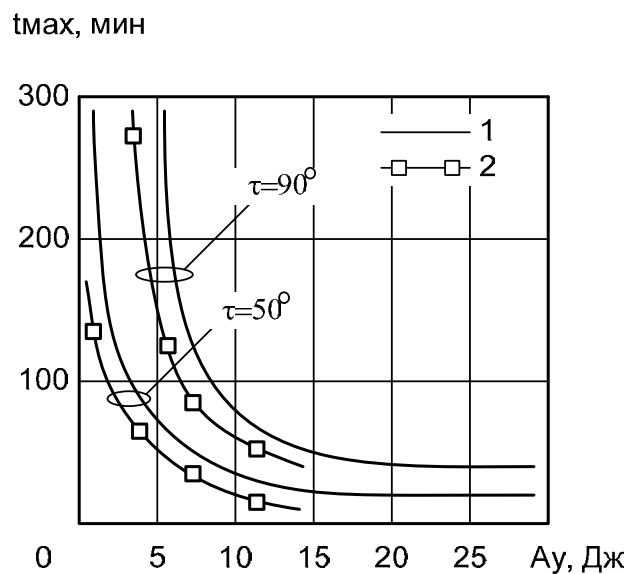


Рис. 6.8. Зависимости максимальной продолжительности работы от величины единичной энергии удара

На графиках также представлены значения указанных параметров, полученных экспериментально в работе [181] для прессы ПЭМ-1,0 с энергией удара 4,2 Дж. Продолжительность работы можно повысить также путем снижения частоты ударов или увеличения постоянной времени нагрева двигателя за счет увеличения, например, активной массы частей машины, принимающих непосредственное участие в теплопередаче. Однако следует отметить, что увеличение активной массы частей машины снижает удельные энергетические показатели электромагнитных ударных машин. Аналогичный характер имеют зависимости для кратковременного режима работы (рис. 6.8) и для других типов машин, представленных в табл. 6.1.

На рис. 6.9 кривые иллюстрируют общую тенденцию влияния энергии единичного удара (с учетом роста геометрических параметров) на продолжительность работы (рис. 6.9 а) и частоту ударов (рис. 6.9 б), где кривые 1, 2 соответствуют машинам с энергией удара до 500 Дж и выше 500 Дж. Каждой точке на графиках соответствует определенный типоразмер электромагнитной ударной машины (табл. 6.1), характеризующийся номинальной энергией удара и массой. Расчеты выполнены по выражению (6.80) для принятой произвольно средней частоты $n=135$ уд/мин.

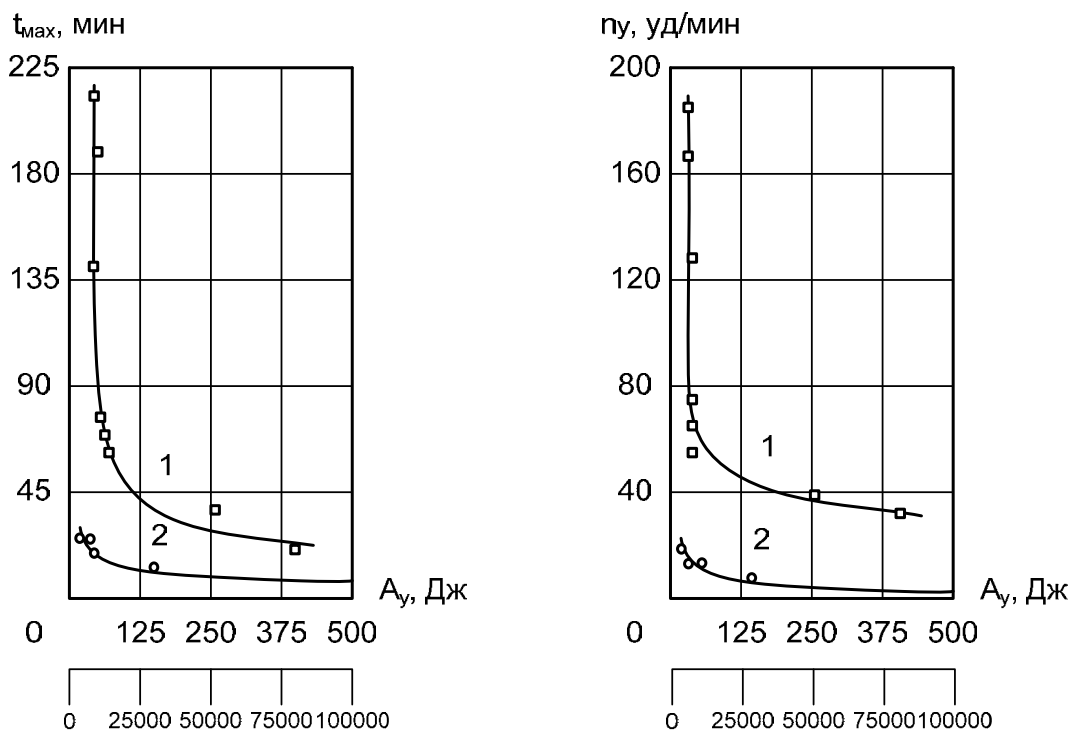


Рис. 6.9. Зависимости продолжительности и частоты работы от распределения энергии единичной удара

Из полученных по табличным данным расчетных зависимостей следует, что наименьшей продолжительностью работы характеризуются машины с энергией удара выше 500 Дж. Анализ зависимостей показывает общую тенденцию снижения продолжительности работы по мере увеличения массогабаритных показателей электромагнитных ударных машин. Следует также отметить, что в кратковременном режиме работы, в особенности в машинах, имеющих высокие массогабаритные показатели, относительно времени нагрева значительно возрастает время паузы, необходимое для их охлаждения до температуры окружающей среды, которая определяется величиной постоянной времени нагрева двигателя. Так, например, постоянные времени нагрева пресс-молота ПЭМ-0,1, имеющего массу двигателя 1,3 кг, и молота МЭМ-10000 с массой двигателя 14,3 т различаются между собой более чем в 15 раз. Таким образом, продолжительность работы в кратковременном режиме можно изменять путем регулирования величины энергии удара или частоты ударов.

В продолжительном режиме по заданной величине энергии удара определим максимальную частоту ударов, при которой температура перегрева электромагнитного двигателя на бесконечно длительном интервале времени работы по условиям нагрева не превысит допустимую.

С учетом условий режима и при предположении, что $n = \infty$, уравнение (6.74) преобразуется и принимает вид решения известного уравнения для коэффициента перегрузки [130; 131; 144; 178]:

$$k_p = \frac{\tau_y}{\tau_{\max}} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{ц}}}{T_0}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T_0}\right)}. \quad (6.83)$$

Выполнив подстановку $t_{\text{ц}} = 60/n_y$ в (6.83) и решая его совместно с (6.79) относительно n_y , получим окончательное выражение для предельно допустимой частоты ударов в квазиустановившемся режиме нагрева в виде:

$$n_y = \frac{60}{T_0} \cdot \ln \left\{ 1 - \frac{k_0 A_y (1 - \eta)}{t_p \eta} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T_0}\right) \right] \right\}^{-1}. \quad (6.84)$$

При $t_{\text{ц}} \ll T$ выражение (6.84) приводится к приближенному виду:

$$n_y = \frac{60\eta}{k_0 A_y (1 - \eta)}. \quad (6.85)$$

Анализ зависимостей в соответствии с рисунком 6.10, полученных по уравнению (6.85) для ряда молотов, данные для которых приведены в табл. 6.1,

показывает, что с понижением энергии удара частота ударов увеличивается (кривые 1, 2, 3 – соответственно для МЭМ-600, -1000, -3000).

Одним из путей увеличения ударной мощности машин при повышении частоты ударов является улучшение условий охлаждения машины. Для этого увеличивают поверхность охлаждения, например, за счёт ее оребрения [12]. Наблюдается также тенденция снижения частоты ударов (рис. 6.9 б) у более крупных электромагнитных ударных машин в продолжительном режиме.

Общая тенденция снижения выходных параметров в кратковременном и продолжительном режиме работы с ростом массогабаритных показателей объясняется опережающим ростом тепловой мощности, выделяемой обмоткой, по отношению к поверхности охлаждения машины. Так, по величине, характеризующей отношение тепловой мощности к поверхности охлаждения в кратковременном режиме работы, пресс-молот ПЭМ-0.2 имеет значение этого показателя в 1,9 раза ниже по сравнению с пресс-молотом ПЭМ-0,8 и в 3,6 раза – по сравнению с ПЭМ-3,0 Д.

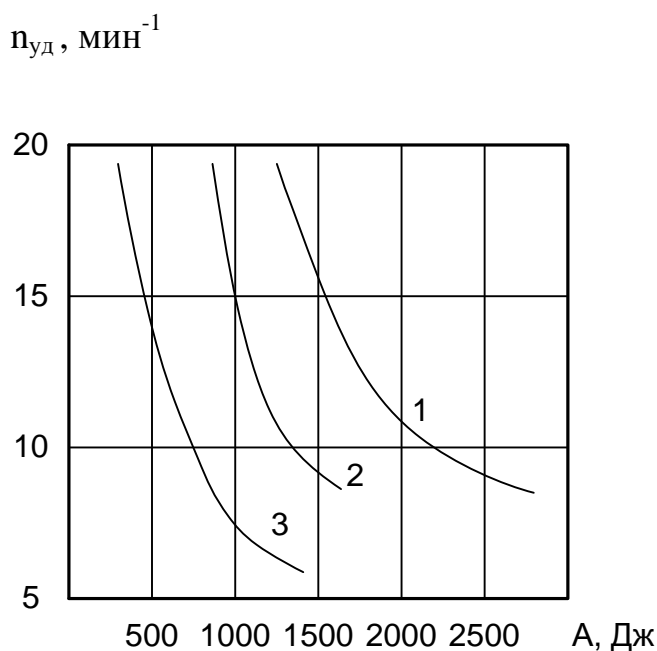


Рис. 6.10. График предельно-допустимых частот удара для ряда электромагнитных молотов

С целью увеличения ударной мощности машин используется повторно-кратковременный режим работы. В рассматриваемом режиме ударная мощность может быть выше допустимой по условию нагрева в продолжительном режиме. Он относится к периодическому и состоит из циклов «работа-пауза» с установленными стандартными значениями относительной продолжительности включения (ПВ, %), равным отношению времени работы ко времени всего цикла.

Действуя как при получении уравнения (6.74) и выражая последующий нагрев в конце цикла «работа-пауза», в соответствии с рис. 6.7, через предыдущий перегрев, можно получить общее уравнение перегрева двигателя в конце работы в k -м цикле в повторно-кратковременном режиме в следующем виде:

$$\tau_{\max k} = \tau_y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_p^I}{T_0}\right) \right] \times \frac{1 - \exp\left(-k \frac{t_{\text{ц}}^I}{T_0}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{ц}}^I}{T_0}\right)}, \quad (6.86)$$

где $t_{\text{ц}}^I$, t_p^I - время работы и время цикла в повторно-кратковременном режиме.

Время работы и время цикла в повторно-кратковременном режиме находятся в следующих соотношениях:

$$t_p^I = t_{\text{ц}}^I \frac{\text{ПВ}}{100}; \quad t_{\text{ц}}^I = t_{\text{ц}}^I \frac{3600}{m}, \quad (6.87)$$

где m – количество включений в час.

Коэффициент перегрузки в повторно-кратковременном режиме:

$$k_p = \frac{\Delta P_{\text{ц}}}{\Delta P_{\text{д}}} = \frac{k_0 A (1 - \eta)}{t_{\text{ц}} \eta},$$

где $\Delta P_{\text{ц}}$ – мощность потерь за время цикла $t_{\text{ц}}$.

С учетом того, что $t_{\text{ц}} = 60/n_y$, выражение для коэффициента перегрузки в повторно-кратковременном режиме работы, преобразуется к виду:

$$k_p = \frac{k_0 n_y A_y (1 - \eta)}{60 \eta}. \quad (6.88)$$

Как и в продолжительном режиме, при предположении, что в (6.86) $k = \infty$ и $\tau_y / \tau_{\max k} = k_p$, с учетом (6.87) и (6.88), выражение для предельно допустимой частоты ударов в повторно-кратковременном режиме принимает вид

$$n_y = \frac{60 \eta}{k_0 A (1 - \eta)} \times \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{3600}{m T_0}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{3600 \times \text{ПВ}}{m T_0 \times 100}\right)} \right]. \quad (6.89)$$

ИЛИ

$$n_y = \frac{60\eta}{k_0 A(1-\eta)} \times \frac{100}{\text{ПВ}} \quad \text{при } t_u^I \ll T_0 \quad (6.90)$$

На рис. 6.10 представлены зависимости предельно допустимой частоты ударов электромагнитных машин от продолжительности включения, полученные с помощью выражений (6.89) и (6.90) и значений энергии удара, приведенных в табл. 6.1. Из анализа зависимостей, изображенных на рис. 6.11, следует, что при работе машин с параметрами, указанными в табл. 1.6, они не удовлетворяют требованиям режима с ПВ = 100%. Для групп машин с энергией удара до 500 Дж относительная продолжительность включения в повторно-кратковременном режиме работы не превышает 0,3...0,5, а с ударной энергией свыше 500 Дж находится в пределах 0,1...0,22.

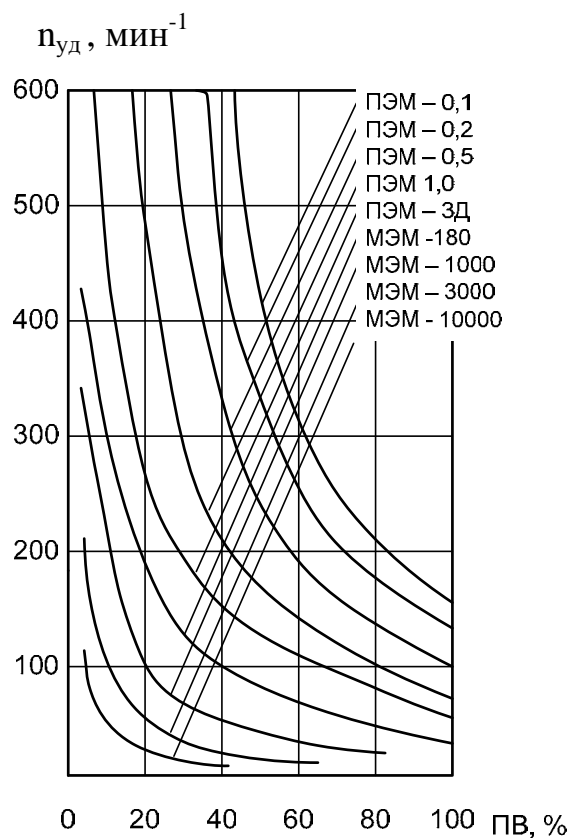


Рис. 6. 11. Зависимости предельно-допустимой частоты ударов от продолжительности включения для различных электромагнитных машин

По результатам экспериментальных исследований систем охлаждения молотов с ударной энергией 30 и 100 кДж, этот показатель в среднем определен на уровне ПВ = 0,15...0,17 [177], что подтверждает корректность полученных выражений (6.89) и (6.90).

Следует отметить, что полученные выражения из-за принятых допущений не предназначены для точных расчетов нагрева и охлаждения электромаг-

нитных ударных машин и могут быть рекомендованы для оценки их тепловых режимов по энергетическим и геометрическим параметрам, известным по расчетам, паспортным данным или экспериментальными исследованиями.

Результаты оценочных расчетов исследуемых режимов по исходным данным, соответствующим известным электромагнитным ударным машинам при естественном способе охлаждения, дают основание считать, что в основном они предназначены для работы в кратковременном и повторно-кратковременном режимах. Приведенные на рис. 6.8...6.11 зависимости позволяют оптимизировать соотношение между энергией единичного удара, частотой ударов и длительностью работы, чтобы в данном режиме работы температура машины не превышала допустимую по условию нагрева.

6.6. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ УДАРА И СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЯКОРЯ ЛЭМД ПРИ ОДНОКРАТНОМ СРАБАТЫВАНИИ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

По мере развития электромагнитных машин с импульсными ЛЭМД их удельные энергетические показатели увеличились в несколько раз. Например, по одному из главных комплексных показателей качественной оценки конструктивного совершенства таких машин – по энергии удара, отнесенной к массе машины, – этот показатель доведен до уровня 6,4 Дж/кг. Для основной массы лучших в своем классе ударных машин в зависимости от режимов работы этот показатель определен на интервале 0,83...5,56 Дж/кг в диапазоне значений единичной энергии удара 0,2...400000 Дж [63]. Максимальная скорость разгона якоря при этом составляет 3...5,5 м/с. Значения предупредительных скоростей, отражающие технический уровень некоторых типов машин ударного назначения с ЛЭМД, используемых на практике в силовом оборудовании, приведены в табл. 6.2.

Представляет интерес оценка предельных значений удельной энергии удара и скорости перемещения якоря ЛЭМД при единичном срабатывании в продольном магнитном поле.

Опыт разработки и исследований ЛЭМД позволил выявить существенное влияние конфигурации магнитной цепи на эти показатели. Поэтому необходимо учитывать и тип магнитной системы, и конструктивные особенности ее элементов.

Решение задачи рассмотрим на примере броневое цилиндрического ЛЭМД с втяжным якорем с фиксированным начальным и конечным его положением (рис. 6.12).

Примем следующие допущения: сечение стали вдоль длины магнитопровода постоянно, величина магнитной энергии, преобразованной в механическую работу, изменяется в пределах объема рабочего воздушного зазора, внешние противодействующие силы отсутствуют, процессы в стали и тепловыделение не учитываются.

Таблица 6.2

Характеристики оборудования с импульсными ЛЭМД

Тип оборудования	Энергия единичного удара А, Дж	Масса ударника m, кг	Коэффициент внедрения якоря $k_{я}$, о.е.	Предударная скорость якоря V_{max} , м/с
Ручной электроинструмент				
ИЭ-4207 (молоток)	4,8	0,40	0,60	4,90
ИЭ-4724 (перфоратор)	2,5	0,28	0,66	4,70
ТТ-312 (перфоратор)	2,3	0,15	0,73	5,54
Прессы				
ПЭМ-0.1	3,0	0,48	0,62	3,53
ПЭМ-0.3	7,0	1,42	0,58	3,13
ПЭМ-0.5	12,0	2,2	0,56	3,30
ПЭМ-1.0	70,0	4,0	0,65	3,16
ПЭМ-3.0	100,0	22,0	0,44	3,01
Молоты				
МЭМ-25	250	60	0,20	2,88
МЭМ-200	2000	200	0,43	4,47
МЭМ-1000	10000	810	0,30	4,97
МЭМ-3000	30000	1950	0,20	5,55

В отношении принятых допущений следует отметить, что они не отличаются от общепринятых в расчетах подобного рода [152; 212 – 216; 241; 242]. Движение якоря под действием электромагнитной силы связано с совершением механической работы, которая в случае отсутствия противодействующего усилия полностью реализуется в виде кинетической энергии:

$$A_{\text{мех}} = \frac{m_{я} V^2}{2}, \quad (6.91)$$

где $m_{\text{я}}$ – масса якоря, V – его линейная скорость в процессе механического движения.

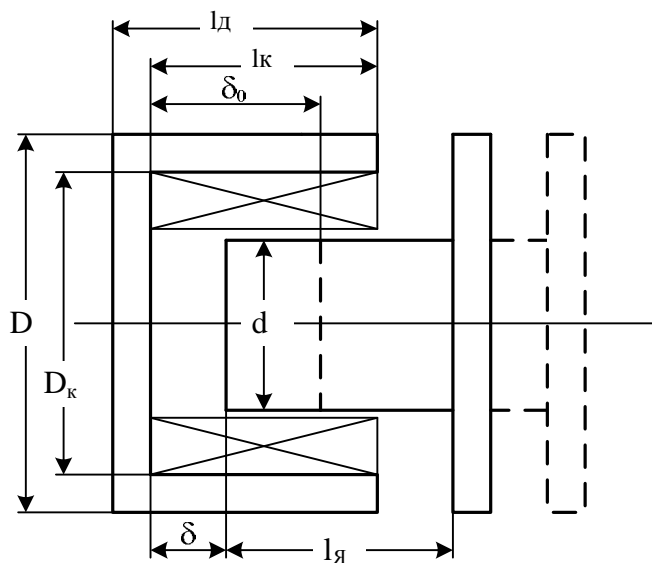


Рис. 6.12. Конструктивная схема ЛЭМД

Производимая ЛЭМД механическая работа на участке движения может быть выражена по-другому:

$$A_{\text{мех}} = \int_{x_0=0}^x F_{\text{ЭМ}} dx, \quad (6.92)$$

где x_0 и x – начальная и текущая координаты положения якоря ($x = \delta_0 - \delta$).

В рамках решаемой задачи и при допущении изменения энергии только в пределах объема рабочего зазора имеем:

$$F_{\text{ЭМ}} = \left(\frac{i^2 dL}{2 dx} \right) \Big|_{i=\text{const}} = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \quad (6.93)$$

где B – магнитная индукция в рабочем воздушном зазоре; S – площадь сечения якоря; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м).

С целью определения влияния интенсивности энергопреобразовательного процесса на энергию механического движения якоря введем понятие степени форсировки ЛЭМД по магнитному потоку. Для этого предположим, что изменение индукции в рабочем зазоре от координаты положения якоря происходит по закону, который близок к реально происходящему. Тогда в соответствии с

имеющимися рекомендациями изменение индукции можно представить в следующем виде [255]:

$$B = B_m \left(\frac{X}{\delta_0} \right)^n, \quad (6.94)$$

где B_m – допустимое из условия насыщения значение индукции в рабочем зазоре; δ_0 – значение рабочего зазора, соответствующее максимальному ходу якоря.

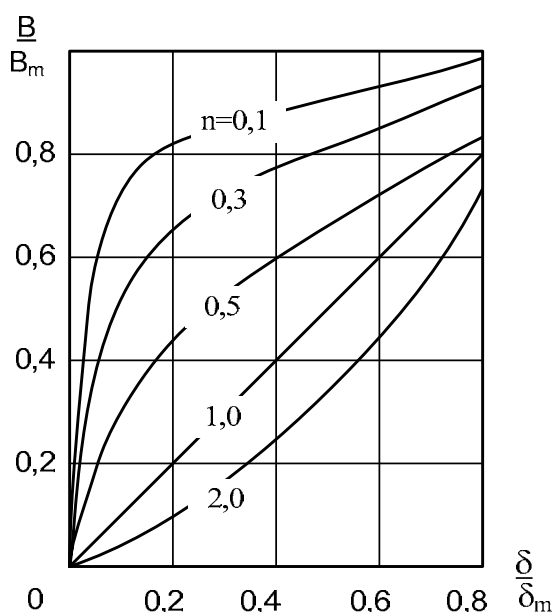


Рис. 6.13. Изменение относительной индукции в зазоре от степени форсировки

Степень форсировки магнитного потока определяется показателем n . Наиболее близки к реальным реализуемые законы изменения индукции по координате положения для значений показателя $0 < n < 1$. На рис. 6.13 представлены зависимости изменения относительной индукции в зазоре B/B_m от относительной координаты положения якоря x/δ_0 . Значение $n = 0$ соответствует максимальной степени форсировки и постоянству магнитной индукции $B = \text{const}$ на всем интервале перемещения якоря. Для $n = 1$ закон изменения индукции в рабочем зазоре характеризуется линейной зависимостью. С ростом показателя n скорость изменения индукции заметно снижается.

В результате подстановки (6.93) и (6.94) в (6.92) выражение для механической работы приводится к виду:

$$A_{\text{мех}} = \int_{x_0=0}^x \frac{B_m^2 S}{2\mu_0} \left(\frac{X}{\delta_0} \right)^{2n} dx. \quad (6.95)$$

После интегрирования (6.95) с учетом пределов изменений x получим:

$$A_{\text{мех}} = \frac{B_m^2 S x^{2n+1}}{2\mu_0 \delta_0^{2n} (2n+1)} \Big|_{x_0=0}^{x=\delta} = \frac{B_m^2 S \delta^{2n+1}}{2\mu_0 \delta_0^{2n} (2n+1)}. \quad (6.96)$$

Как правило, во втяжных ЛЭМД ход якоря осуществляется в пределах длины катушки.

Выразим величину рабочего воздушного зазора δ через относительную начальную глубину внедрения якоря $k_{\text{я}}$ и линейный размер катушки $l_{\text{к}}$. В соответствии с рис. 6.12 при ходе якоря, равном длине катушки модуля ЛЭМД ($\delta_0 = l_{\text{к}}$), имеем $\delta_0 = \delta(1 - k_{\text{я}})$, а это позволяет представить механическую работу по выражению (6.96) в виде:

$$A_{\text{мех}} = \frac{B_m^2 S \delta_0 (1 - k_{\text{я}})^{2n+1}}{2\mu_0 (2n+1)}. \quad (6.97)$$

Величина $S\delta_0 = V_{\text{я}}^1$ в (6.97) при $\delta_0 = l_{\text{я}}$ характеризует объем рабочего воздушного зазора, вытесняемый якорем. Пределы изменения коэффициента внедрения $k_{\text{я}} = 0 \dots 1,0$. При $k_{\text{я}} = 0$ начальная координата положения якоря соответствует рабочему воздушному зазору $\delta = \delta_0$.

При $k_{\text{я}} = 1$ получим $\delta = 0$, то есть якорь полностью втянут, магнитная система находится в состоянии магнитного и механического равновесия, и работа не производится. Значения коэффициентов внедрения для некоторых практических устройств с ЛЭМД приведены в табл. 6.2.

Полагаем в (6.97), что ход якоря осуществляется в пределах длины катушки ($l_{\text{я}} = l_{\text{к}}$). Выражая максимальный ход якоря, определяемый его линейным размером $l_{\text{я}}$, через относительную начальную глубину внедрения $k_{\text{я}}$ в соответствии с (6.97) получим:

$$A_{\text{мех}} = \frac{B^2 S l_{\text{я}} (1 - k_{\text{я}})^{2n+1}}{2\mu_0 (2n+1)}. \quad (6.98)$$

Произведение $S l_{\text{я}}$ в (6.98) определяет объем воздушного зазора $V_{\text{я}}^1$, вытесняемый якорем при полном его внедрении ($\delta = 0$). Тогда выражение для механической работы (6.98) может быть приведено к виду:

$$A_{\text{мех}} = \frac{B^2 V_{\text{я}}^1 (1 - k_{\text{я}})^{2n+1}}{2\mu_0 (2n+1)}. \quad (6.99)$$

Из условия равной загрузки магнитопровода по магнитному потоку выразим объем воздушного зазора $V_{\text{я}}^1$ через объем двигателя $V_{\text{д}}$ ЛЭМД (рис. 6.12) и его основные линейные размеры:

$$V_{\text{я}}^1 = V_{\text{д}} \frac{d^2}{D^2} \left(1 - \frac{d}{2l_{\text{д}}} \right), \quad (6.100)$$

где d – диаметр якоря; D – внешний диаметр двигателя; $l_{\text{д}}$ – длина двигателя.

Вводя в (6.100) относительные безразмерные величины $x = \frac{d}{D}$, $y = \frac{l_{\text{д}}}{D}$, запишем:

$$V_{\text{я}}^1 = V_{\text{д}} x^2 \left(1 - \frac{x}{2y} \right). \quad (6.101)$$

В результате подстановки (6.101) в (6.99) механическая работа определяется выражением:

$$A_{\text{мех}} = V_{\text{д}} x^2 \left(1 - \frac{x}{2y} \right) \frac{B^2 (1 - k_{\text{я}})^{2n+1}}{2\mu_0 (2n + 1)}.$$

Согласно закону сохранения энергии в машинах ударного действия кинетическая энергия движения якоря в конце процесса энергопреобразования равна энергии удара $A_{\text{у}}$.

Приняв в последнем выражении для механической работы за максимальное значение индукции ее значение в области насыщения магнитопровода на уровне $B = 2,0$ Тл, представим выражение для предельной энергии в объеме ЛЭМД в виде:

$$A_{\text{мех}} = 0,159 \times 10^7 V_{\text{д}} x^2 \left(1 - \frac{x}{2y} \right) \frac{(1 - k_{\text{я}})^{2n+1}}{(2n + 1)}.$$

Из анализа доступной литературы следует, что рекомендуемые различными авторами из условия получения максимальной работы в единице объема значения относительных величин x и y лежат в весьма широких пределах [212 – 216]. Откуда следует, что x может находиться в диапазоне 0,41...0,57, а y в диапазоне 0,62...1,2 (табл. 6.3). Сравнительно широкий диапазон изменения этих величин можно объяснить различием используемых методик и допущений при оптимизации указанных параметров.

Если принять вес обмоточного материала приближенно равным весу стали магнитопровода, массу двигателя можно определить как $m_{\text{д}} = V_{\text{д}} \gamma_{\text{с}}$ (где, $\gamma_{\text{с}} = 7800$ кг/м³), что позволяет окончательно перейти к выражению для удельной энергии в объеме ЛЭМД:

$$a_{\text{мех}} = \frac{A_{\text{мех}}}{m_{\text{Д}}} = 203,846 \times x^2 \left(1 - \frac{x}{2y}\right) \left(\frac{1 - k_{\text{я}}}{2n + 1}\right)^{2n+1}. \quad (6.102)$$

Таблица 6.3

Соотношения основных размеров магнитопровода ЛЭМД с втяжным якорем

№	Расчетные соотношения	Относительные величины		Ссылка на литературу
		$x = \frac{d}{D}$	$y = \frac{l_{\text{Д}}}{D}$	
1	$l=0,91D; D=2,2d; l=2d$	0,455	0,91	[214]
2	$D_{\text{к}}=0,88D; d=0,477D; h_{\text{к}}=0,119D$	0,477	не опред.	[212], [213]
3	$d=(0,62...0,69)D_{\text{к}}; l_{\text{к}}=(1,1...1,6)d$	0,53...0,57	1,03...1,2	[215]
4	$h_{\text{к}}=(0,55...0,6)d; l_{\text{к}}=(1,1...1,6)d$	0,41...0,43	0,62...0,91	[216]

Расчетные значения удельной энергии $a_{\text{мех}}$ в зависимости от степени форсировки магнитного поля и коэффициента внедрения якоря в диапазоне рекомендуемых значений x и y приведены на рис. 6.14 а. При максимальной форсировке магнитного поля $n = 0$ и минимальной глубине внедрения якоря $k_{\text{я}} = 0$ удельная энергия в объеме ЛЭМД может достигать $a_{\text{мех}} = 54$ Дж/кг. Здесь необходимо отметить, что приведенное выше значение удельного показателя энергии определено при максимально возможном значении хода якоря, соответствующем рекомендуемому диапазону изменения параметров x и y . Реальная электромеханическая система с ЛЭМД характеризуется вполне определенным коэффициентом внедрения якоря, который для двигателя с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами находится в диапазоне значений $k_{\text{я}} = 0,7...0,8$.

Исходя из результатов экспериментальных исследований следует принять $x = 0,45$ и $y = 1,0$, а это позволяет определить максимальную энергию в оптимальном объеме ЛЭМД, которая равна $a_{\text{мех}} \approx 12...15$ Дж/кг.

Из (6.102) следует, что энергия в объеме ЛЭМД в значительной степени зависит от относительной начальной глубины внедрения якоря и конфигурации магнитной цепи.

Выражая в (6.97) объем якоря в виде $V_{\text{я}}^1 = S\delta_0$ и представляя массу якоря как $m_{\text{я}} = \gamma_c V_{\text{я}}^1$, в результате совместного решения (6.91) и (6.97) получим выражение для определения максимальной скорости якоря:

$$V = \sqrt{\frac{B_m^2 (1 - k_{\text{я}})^{2n-1}}{\mu_0 \gamma_c (2n + 1)}}. \quad (6.103)$$

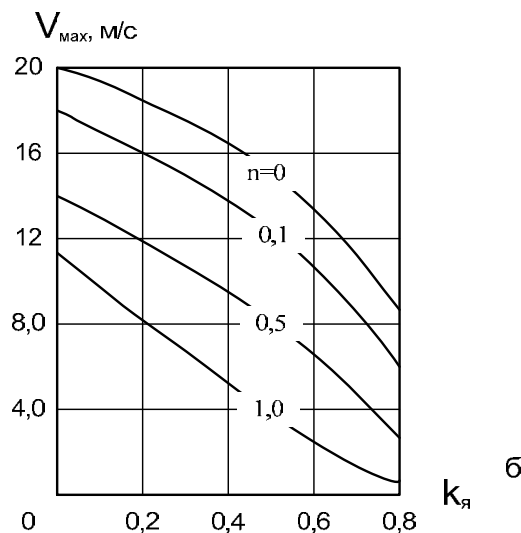
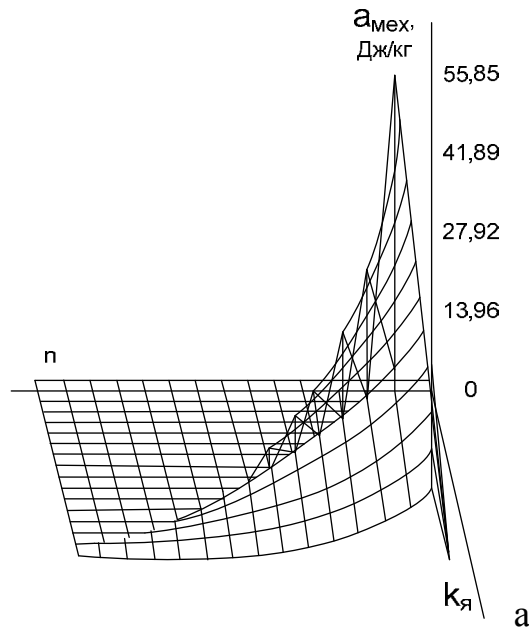


Рис. 6.14. Зависимости предельных показателей ЛЭМД: а – удельной энергии от степени форсировки магнитного поля n и коэффициента внедрения якоря $k_{\text{я}}$; б – максимальной скорости движения якоря от коэффициента внедрения якоря $k_{\text{я}}$

При $k_{\text{я}} = 0$ и $n = 0$ выражение для скорости V преобразуется в известное выражение, полученное профессором В.В. Ивашиным [255] для поперечного в области энергопреобразования магнитного поля в виде:

$$V_{\text{max}} = \frac{B_m}{\sqrt{\mu_0 \gamma_c}}.$$

Последнее выражение позволяет сделать предположение, что скорость якоря в энергопреобразовательном процессе не зависит от вида магнитного поля и определяется только свойствами конструкционных материалов (B_m, γ_c), относительной начальной глубиной внедрения якоря ($k_{\text{я}}$) и степенью форсировки магнитного потока (n).

На рис. 6.14 б по зависимости (6.103) построены графики скорости якоря в функции относительной начальной глубины внедрения якоря для различных значений n . Из графиков следует, что максимальная скорость резко убывает с увеличением показателя степени форсировки и относительной начальной глубины внедрения якоря. Так, например, при $n = 0,1$ конечная скорость в 1,26 раза выше, чем при $n = 0,5$, а при $k_{\text{я}} = 0,4$ скорость в 1,7 раза ниже, чем при $k_{\text{я}} = 0,1$. Следовательно, для увеличения скорости необходимо обеспечивать максимальную степень форсировки потока и минимальную начальную глубину внедрения якоря ($k_{\text{я}} = 0$).

Исходя из этого, приняв за максимальное значение индукции при насыщении стали на уровне $B = 2,0$ Тл и полагая в (6.103) $n = 0$ и $k_{\text{я}} = 0$, получим максимальную скорость при однократном процессе ускорения якоря в продольном магнитном поле, как и в поперечном поле, равную $V_{\text{max}} \approx 20$ м/с.

В ряде случаев возникает необходимость в определении удельной энергии для ЛЭМД с вполне определенной конфигурацией магнитной цепи. Наиболее признанной характеристикой формы магнитной цепи в теории проектирования электромагнитов [162, 212] считается конструктивный фактор, имеющий вид:

$$\Pi = \frac{\sqrt{F}}{\delta}. \quad (6.104)$$

Соотношение (6.104) позволяет установить взаимную связь между формой магнитной цепи, величиной хода и электромагнитного усилия. После несложных преобразований (6.104) с учетом выражения для статического усилия воздушный зазор, соответствующий максимальной работе, определится как

$$\delta = d \sqrt{\frac{B_{\Pi}^2 \pi}{\Pi^2 8 \mu_0}}.$$

Выражение для коэффициента внедрения якоря примет тогда следующий вид:

$$k_{\text{я}} = 1 - \frac{d}{l_{\text{к}}} \sqrt{\frac{B_{\text{п}}^2 \pi}{\Pi^2 8 \mu_0}}, \quad (6.105)$$

где $B_{\text{п}}$ – рациональное значение индукции в рабочем зазоре, определяемое по статической характеристике в соответствии с принятой конфигурацией магнитной цепи [212].

С учетом условия равномерной загрузки магнитопровода по магнитному потоку и введенных безразмерных параметров выражение (6.105) можно привести к виду:

$$k_{\text{я}} = 1 - \frac{2x}{2y - x} \sqrt{\frac{B_{\text{п}}^2 \pi}{\Pi^2 8 \mu_0}}. \quad (6.106)$$

При подстановке (6.106) в (6.102) и условии, что $k_{\text{я}} = 0$, $n = 0$, получим выражение для предельной энергии удара в оптимальном объеме ЛЭМД с вполне определенной конфигурацией магнитной цепи:

$$A_{\text{мех}} = B^2 V_{\text{д}} \frac{x^3}{y} \sqrt{\frac{B_{\text{п}}^2 \pi}{\Pi^2 32 \mu_0^3}}. \quad (6.107)$$

Полагая приблизительно равными значения плотностей обмоточного материала и стали магнитопровода, из (6.107) получим выражение для определения удельной энергии удара:

$$a_{\text{мех}} = \frac{B^2 x^3}{\gamma_{\text{с}} y} \sqrt{\frac{B_{\text{п}}^2 \pi}{\Pi^2 32 \mu_0^3}}. \quad (6.108)$$

В (6.108) входят постоянные коэффициенты, относительные геометрические размеры, индукция, величина которой ограничена насыщением стали магнитопровода, и конструктивный фактор, пределы изменения которого представлены в относительно широком интервале, охватывающем все основные конструктивные формы исполнения цилиндрических броневых электромагнитных систем $\Pi = (0,012 \dots 626) \cdot 10^3 \text{ Н}^{0,5} / \text{м}$. Например, значение конструктивного фактора для короткоходовых магнитных систем с втяжным якорем, имеющих круглый сердечник с плоскими торцами, определено в пределах $\Pi = (5,0 \dots 28,2) \cdot 10^3 \text{ Н}^{0,5} / \text{м}$ [212; 213]. Здесь следует уточнить, что изменение конструктивного фактора относительно указанных пределов характеризует переход к типу ЛЭМД с новой конфигурацией магнитной цепи.

Принимая, например, при $B=2,0 \text{ Тл}$ значения $\Pi=5 \cdot 10^3 \text{ Н}^{0,5} / \text{м}$, и $B_{\text{п}} = 0,65 \text{ Тл}$ [212], с учетом пределов изменения параметров $x = 0,41 \dots 0,57$ и $y = 0,62 \dots 1,2$ (табл. 6.3), после подстановки в (6.108) получим $a_{\text{мех}} \approx 4,42 \text{ Дж/кг}$. Таким образом, для рассматриваемого типа ЛЭМД предельный показатель по удельной энергии удара ограничен примерно на уровне 5 Дж/кг.

Относительно широкий диапазон по удельной энергии объясняется тем, что рекомендуемые разными авторами соотношения основных размеров плохо согласуются между собой. В связи с этим следует учесть влияние оптимальных значений соотношений размеров на удельную энергию удара. Анализ зависимости (6.108) позволяет установить тенденцию роста удельной энергии, связанную с увеличением в заданном диапазоне значения x и уменьшением y .

В связи с этим следует также учесть существенное влияние некоторых факторов, не рассматривавшихся при проведении анализа. Одним из таких неучтенных факторов является, например, насыщение стали магнитопровода, которое существенно возрастает с увеличением x за счет роста коэффициента рассеяния. При обеспечении сравнительно высоких рабочих индукций форсированных ЛЭМД наличие больших потоков рассеяния приводит к насыщению магнитопровода и, как следствие, к уменьшению его работоспособности. А уменьшение x за счет внешнего диаметра при сохранении площади окна катушки в диапазоне допустимых значений y увеличивает среднюю длину витка катушки, ее сопротивление, следовательно, и мощность тепловых потерь.

Окончательный выбор значений x и y будет обусловлен конструктивными особенностями общей компоновки и технологией изготовления ЛЭМД.

Степень достоверности полученных значений для удельной энергии, очевидно, связана с правомерностью принятых в исследованиях допущений. Используемое для анализа допущение постоянства тока является частным случаем режима энергопреобразования в процессе движения, принятое в исследованиях как основное условие выделения максимальной мощности. Реализация последнего стала возможна при использовании специальных средств регулирования тока. Кроме этого, в соответствии с решаемой задачей указанный режим энергопреобразования, если сравнивать его с другими, характеризуется относительно высоким тяговым усилием. Приведенные исследования позволяют качественно оценить возможный достигаемый уровень удельной энергии удара в оптимальном объеме цилиндрического втяжного ЛЭМД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии обобщены результаты работ, связанных с поиском путей повышения силовых и энергетических показателей импульсных ЛЭМД, с совершенствованием методов их расчета.

В работе обоснована важная роль импульсных ЛЭМД в реализации высокоэнергетических технологий и определены пути достижения этой цели. Новые конструкции броневых цилиндрических магнитных систем ЛЭМД позволили в 1,5...2,2 раза повысить удельное значение тягового усилия и механической энергии двигателей, расширить их функциональные возможности и область их применения. Экспериментально и теоретически доказана эффективность повышения удельных энергетических показателей и КПД двигателей за счет увеличения уровня искусственно аккумулируемой на этапе трогания якоря ЛЭМД магнитной энергии. Для ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами энергия удара и КПД возросли более чем в 4 и 2 раза соответственно.

Предложенные математические модели магнитных цепей импульсных ЛЭМД с двумя рабочими зазорами, комбинированным якорем и ферромагнитным направляющим корпусом позволяют рассчитывать необходимые статические характеристики двигателей во всех диапазонах изменения рабочих зазоров.

На основе выполненных исследований были разработаны и внедрены машины и оборудование с импульсными ЛЭМД в машиностроение, литейное производство, радиоэлектронную, приборостроительную, легкую промышленность, строительство. Это позволило повысить производительность труда, качество изготавливаемых деталей, культуру производства, улучшить условия труда, снизить потребление электроэнергии, эксплуатационные расходы и высвободить производственные площади.

Дальнейшее раскрытие больших потенциальных возможностей импульсных линейных электромагнитных двигателей, являющихся важным звеном специального электропривода, связано как с углублением исследований, обобщенных в монографии, так и с постановкой и решением новых проблем по мере развития электромашиностроения, преобразовательной техники, материаловедения и других смежных областей электротехники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожевников С.Н., Есипенко Я.И., Раскин Я.М. Механизмы. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 784 с.
2. Повидайло В.А., Силин Р.И., Шигель В.А. Вибрационные устройства в машиностроении. – М.: Машгиз, 1962. – 111 с.
3. Ряшенцев Н.П. Виброимпульсные системы в горном деле //Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1987. – №6. – С. 51-62.
4. Фролов К.В. Научно-технический прогресс и современные задачи машиностроения. – М., 1985. – 40 с.
5. Ряшенцев Н.П., Алабужев П.М., Никишин Н.И. и др. Ручные электрические машины ударного действия. – М.: Недра, 1970. – 198 с.
6. Рагульскис Л.К., Рагульскис К.М. Колебательные системы с динамическим направленным вибровозбудителем. – Л.: Машиностроение, 1987. – 132 с.
7. Шнеерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная сейсморазведка с невзрывными источниками колебаний. – М.: Недра, 1980. – 205 с.
8. Москвитин А.И. Электрические машины возвратно-поступательного движения. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 144 с.
9. Ряшенцев Н.П., Ащепков Ю.С., Симонов Б.Ф. и др. Управляемое сейсмическое воздействие на нефтяные залежи. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1989. – 60 с.
10. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г. Львицин А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
11. Свирщевский В.К. Механизмы для отбора кернов из стенок скважин. – Новосибирск: Наука, 1969. – 65 с.
12. Малов А.Т., Ряшенцев Н.П., Носовец А.В. и др. Электромагнитные молоты. – Новосибирск: Наука, 1979. – 269 с.
13. Манжосов В.К., Лукутина Н.О., Невенчанная Т.О. Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Илим, 1985. – 185 с.
14. Симонов Б.Ф. Исследование и создание электромагнитных ударных узлов для трамбуемых машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1981. – 24 с.
15. Бансявичус Р.Ю., Рагульскис К.М. Вибродвигатели. – Вильнюс, 1981. – 193 с.
16. Потураев В.Н., Франчук В.П., Червоненко А.Т. Вибрационные транспортные машины. – М.: Машиностроение, 1964. – 216 с.
17. Усаковский В.М. Инерционные насосы. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
18. Чанышев Р.О., Хлебников Б.М., Бажин В.Т. и др. Универсальный реактор для гетерофазных процессов с электромагнитным виброперемешивающим устройством //Процессы и аппараты производства полимеров, методы и оборудование для переработки их в изделия: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – М.: Изд-во МИХМ, 1977. – С. 53.

19. Чанышев Р.О., Бажин В.Т., Смелягин И.А. и др. Разработка и создание импульсной электромагнитной вибротриггера // Тез. докл. Всесоюз. конф. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1977. – С. 130.
20. Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н., Финченко Н.И. Сдвоенный электромагнитный компрессор // Исследование электрических силовых импульсных систем. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1974. – С. 56.
21. Белькинд Л.Д. Андре-Мари Ампер. – М.: Наука. – 276 с.
22. Гусев С.А. Очерки по истории развития электрических машин. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 182 с.
23. Ефремов В.Д., Радовский М.И. История электродвигателя. – М.: Изд-во АН СССР, 1938. – 368 с.
24. О применениях электричества в горном деле. Электродвигатели Ван-Деполя // Электричество. - 1981. - №3. - С. 25-27.
25. Нейман В.Ю., Ряшенцев Н.П. Вибрационные насосы: Институт горного дела СОАН СССР. – Деп. В ВИНТИ 15.10.90.– №6239 – В90. – 17 с.
26. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 259 с.
27. Лысов Н.Е., Монкевич А.А. Электромагнитный пресс для сухого прессования кирпича // Вестник электропромышленности. – 1940. – №2. – С. 14-18.
28. Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н. Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 152 с.
29. Олейник И.В., Кычин В.П., Луговской А.Л. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин. – М.: Техника, 1984. – 151 с.
30. Шаврин О.И. Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
31. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Федонин В.Н. и др. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
32. Yamada H. Hand book of linear motor Applications. – Japan: Kogyo Chosokai Publishing Co., Ltd., 1986. – 561 p.
33. Берозашвили Г.В., Гелашвили В.Н. Теория, расчет и вопросы возбуждения электромагнитных вибрационных машин. – Тбилиси: Изд-во «Сабчота сакартвело», 1978. – 175 с.
34. Слуцкий М.Е., Яковлев О.Н., Андреев-Рыбаков Л.И. Электромагнитные штамповочные прессы. – М.: Машгиз, 1955. – 23 с.
35. Электромагнитный пресс // Указатель чертежно-конструкторской документации, поступивший в фонд ЦНТИ. – Пермь: ЦНТИ, 1978. – Вып.1.
36. Стипинекс Р.Т. Электромагнитные прессы. – Рига, 1955.– 53 с.
37. Средства малой механизации сборки приборов. – М.: ЦИГТИЭПП, 1961. – №4. – С. 33-34.
38. Угаров Г.Г., Львицин А.В., Федонин В.Н. и др. Пресс усилием 30 кН с линейным электромагнитным приводом // Информ. листок. – Саратов: ЦНТИ.– 1984. – серия 55.29.31. – №41-84.
39. Малов А.Т., Ряшенцев Н.П. Расчет и конструкции станков для клепки шарнирных соединений. – Новосибирск: Наука, 1968. – 126 с.

40. Magnethammer-Bander-Bleche-Rohre. - 1962. - № 8. - P.155.
41. Leulsungsstarke Maqnethamraer // Mash, und Werkzeug-Europa-Technic-1962.-№16. -P.63.
42. Magnethammer als rationale Fertiqimqsmittel // Mash, und Werkzeug-Europa-Technic. – 1966. – Vol. 67. – № 24. – P. 48.
43. Autelka tupe H100 electromagnetical riveting machine //Mashineru. – 1962. – Vol. 101. – № 2605. – P. 882- 883.
44. Нумератор с электромагнитным приводом // Перечень рабочих чертежей на нестандартное оборудование.- Владимир: ЦНТИ, 1979.- Вып.1.- С. 26-28.
45. Ряшенцев Н.П., Малов А.Т., Угаров Г.Г. и др. Обоснование и проектирование мощных электромагнитных машин ударного действия //Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – №2. – 1970. – С. 42-49.
46. Электромагнитные машины возвратно-поступательного движения: Сб. науч. тр. / Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. - Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1971. – 169 с.
47. Электрические линейные двигатели: Сб.науч. тр. / Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1972. – 178 с.
48. Малахов А.П., Тимошенко Е.М., Малов А.Т. и др. Исследование рабочих процессов импульсных машин и механизмов, создание и совершенствование горных и строительных машин //Отчет о НИР (заключительный) / Институт горного дела СОАН СССР. – № ГР81081324. – Новосибирск, 1985. – 247 с.
49. Ряшенцев Н.П., Симонов Б.Ф., Ильинский Н.К. Электромагнитный молот для погружения свай //Газовая промышленность. – 1984. – №11. – С. 11-15.
50. Кадышев А.И., Симонов Б.Ф., Бритков Н.А. Натурные испытания и доработка электромагнитного сваебойного комплекса с энергией удара 100 кДж / Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Импульсные линейные электромагнитные машины: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 91-98.
51. Симонов Б.Ф., Кадышев А.И., Бритков Н.А. Расчет исходных данных для проектирования электромагнитов молота простого действия /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева //Импульсные линейные электромагнитные машины: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 14-18.
52. Угаров Г.Г. Принципы повышения удельных силовых и энергетических показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Импульсные линейные электромагнитные машины: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 43-50.
53. Генкин М.Д., Русаков А.М., Яблонский В.В. Электродинамические вибраторы. – М.: Машиностроение, 1975. – 94 с.
54. Ямпольский Ю.Г. О проектировании оптимальных линейных импульсных электродинамических двигателей возвратно- поступательного движения //Электротехника. – 1990. – №2. – С. 51-55.
55. Ивашин В.В., Милорадов И.А., Плотников С.Б. Индукционно-динамический тормоз для ударного стенда /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Электрические импульсные системы: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1976. – С. 82-87.

56. Кабачков Ю.Ф., Махнев А.М. Линейный асинхронный двигатель в приводе мощных ударных машин /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Электрические виброимпульсные системы: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1984. – С. 104-110.

57. Кабачков Ю.Ф., Е.А. Костогорова, Н.М. Кравченко и др. Импульсный сейсмоисточник с приводом от линейного асинхронного двигателя /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Импульсный электромагнитный привод: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 153-158.

58. Килин В.П. Использование электромагнитного молота для выбойки отработанной футеровки катодных устройств алюминиевых электролизеров /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Электрические виброимпульсные системы: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1984. – С. 100-103.

59. Иванников Н.А., Уланов В.В., Шарыпов А.К. Повышение удельной мощности импульсного индукционно-динамического преобразователя сейсмических колебаний /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Импульсный электромагнитный привод: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 134-140.

60. Бритков Н.А., Иванов В.И., Ряшенцев Н.П. и др. Исследование передвижного электромагнитного импульсного источника сейсмических колебаний /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Электромагнитные силовые импульсные системы: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1982. – С. 30-36.

61. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. К оценке режимов работы электромагнитных ударных машин //Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – №4. – С. 72-80.

62. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.

63. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Анализ показателей электромагнитных ударных машин //Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – №2. – С. 72-80.

64. SU № 1823269 A1 B21J 7/30 Устройство для ударного деформирования /Э.Ф.Маер, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров и А.В. Львицын. – 12.10.92. Не публикуется.

65. SU № 1718439 A1 B21J 7/30 Электромагнитный пресс / Э.Ф.Маер, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров и А.В. Львицын. – 08.11.91. Не публикуется.

66. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю., Усанов К.М. Переносной электромагнитный ударный привод //Совершенствование технических средств электрического транспорта. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – С. 164-170.

67. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии //Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 2002. – №2. – С. 37-43.

68. RU № 59342 H02K 33/02 Линейный электромагнитный двигатель с удержанием якоря /В.И. Мошкин, К.М. Усанов, А.В. Волгин. – 10.12.06, БИ № 34.

69. SU № 2018652 C1 E21C 3/16 Электрический молот /Э.Ф. Маер, В.И. Мошкин и И.П. Попов. – 23.04.93, БИ №16.

70. Тронов А.П. Исследование и создание ручных машин ударного действия с электромагнитным приводом: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1964.– 147 с.
71. Мошкин В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с регулируемыми выходными параметрами: Дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: ИГД СО РАН. 1992. – 177 с.
72. Перьев А.А. Создание ручного электромагнитного молотка с энергией удара 15 Дж: Дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1991. – 209 с.
73. Осокин А.Л. Разработка ударного узла электромагнитного перфоратора для бурения отверстий малого диаметра: Дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1989. – 184 с.
74. Бритков Н.А., Малахов А.П., Ряшенцев Н.П. и др. Электромагнитный импульсный сейсмоисточник малой мощности /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева //Электромагнитные импульсные системы: Сб. науч. тр. – Новосибирск, 1969. – С. 3-13.
75. Малахов А.П., Ушаков В.П., Нейман А.К. и др. Электромагнитный молот для забивки свай /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева //Электромагнитные машины ударного действия: Сб. науч. тр. - Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1978. – С. 69-74.
76. Кабачков Ю.Ф., Вайнер Б.М., Лесников В.В. Применение электробутобоя при разделке негабаритных блоков магнезита //Огнеупоры. – 1982. – №9. – С. 21-23.
77. SU 1040138 E 21 C 3/16 Устройство ударного действия для дробления негабарита горных пород / Кабачков Ю.Ф. – 07.09.83, БИ №33.
78. SU 987755 D 01 H 7/90 Вторичный элемент линейного асинхронного электродвигателя / Кабачков Ю.Ф., Вайнер Б.М. – 15.10.89, БИ №38.
79. Ряшенцев Н.П., Сбоев В.М. Классификация электромагнитных машин возвратно-поступательного движения //Исследование электрических машин возвратно-поступательного движения. – Новосибирск: Наука, 1969. – С. 3-13.
80. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю., Нейман Л.А. Конструктивные схемы импульсных линейных электромагнитных двигателей ударных машин с устройствами нагружения якоря в статических режимах //Вестник Красноярского гос. техн. ун-та. Транспорт /Под ред. В.И. Пантелеева. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2000. – Вып. 20. – С. 76-82.
81. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Принципы интегрирования конструкций импульсных линейных электромагнитных двигателей с устройствами форсированного аккумулирования энергии //Механизмы переменной структуры и виброударные машины: Тез. второй международной конференции. – Бишкек, 1995. – С. 31-32.
82. Левченко Э.Ф. Форсировка электромагнитов //Электротехника. – 1967. – №2. – С. 60-62.
83. Тер-Акопов А.К. Динамика быстродействующих электромагнитов. – М.: Энергия, 1965. – 165 с.
84. Туровский П.С., Фролов А.В. Расчет конструирование и создание электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Изд-во АН Кирг. ССР, 1984. – 129 с.

85. Тер-Акопов А.К. Аналитический метод расчета динамики электромагнитов постоянного тока //Электричество. – 1960. – №5. – С. 1-5.
86. SU № 1705890 Н 01 F 7/13. Электромагнит постоянного тока / В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров, М.А. Терехенин. – 15.01.92, БИ №2.
87. SU № 1534523 Н 01 F 7/13. Электромагнит постоянного тока / М.А. Терехенин, Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман. – 07.01.90, БИ № 1.
88. Нейман В.Ю. Электромеханические преобразователи непосредственного привода с периодической дискретно-однородной структурой магнитной цепи //Науч. вестн. НГТУ. – Новосибирск, 2002. – № 1 (12). – С. 109-120.
89. Угаров Г.Г., Усанов К.М., Нейман В.Ю. Рабочий цикл электромагнитной ударной машины с аккумулярованием магнитной энергии в период холостого хода //Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1997. – №3. – С. 76-80.
90. Угаров Г.Г., Катаев В.Ф., Хусаинов И.М. и др. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с интегрированной структурой //Электроприводы переменного тока: Труды одиннадцатой науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 1998. – С. 40-43.
91. RU № 2099175 В 25 D 13/00. Электромагнитный ударный инструмент / В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. – 20.12.97, БИ № 35.
92. RU № 2084071 Н 02 К 33/02. Линейный электромагнитный двигатель / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман. – 10.07.97, БИ № 19.
93. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Конструктивные схемы линейных электромагнитных ударных машин с устройствами форсированного аккумулярования магнитной энергии //Строительные материалы и технология: Сб. тез. докл. науч.-техн. конф. – Новосибирск, 1997. – С. 79-80.
94. Нейман В.Ю. Интегрированные импульсные электромагнитные двигатели с повышенными силовыми и энергетическими показателями //Электротехника электротехнические системы и комплексы: Материалы международной науч.-техн. конф. – Томск: ТПУ, 2003. – С. 22-24.
95. RU № 2127017 Н 02 К 33/02. Способ управления однообмоточным линейным электромагнитным двигателем ударного действия / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман, К.М. Усанов. – 27.02.99, БИ № 6.
96. Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с повышенными силовыми и энергетическими показателями: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. – Новосибирск, 1992. – 46 с.
97. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Повышение удельных силовых показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами //Импульсные линейные электромагнитные машины: Сб. науч. тр. /Под. общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 50-56.
98. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Прессовое оборудование с линейными электромагнитными двигателями //Электромагнитные силовые импульсные системы: Сб. науч. тр. /Под. общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1982. – С. 3-13.

99. SU №821018 В 21 J 7/30 Электромагнитный пресс / А.В. Львицин, Г.Г. Угаров, Г.А. Витмаер, В.Н. Федонин. – 15.04.81, БИ №14.

100. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В. Исследование динамики мощного электромагнитного двигателя с удержанием якоря //Физ-техн. проблемы разраб. полезных ископаемых. – 1988. – № 6. – С. 14-17.

101. Мошкин В.И., Егоров А.А., Угаров Г.Г. Исследование режимов форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях //Вестник СГТУ №1 (10). – Саратов, СГТУ, 2006. – С. 39-44.

102. Мошкин В.И. Импульсные электромагнитные двигатели с регулируемыми параметрами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1992. – 20 с.

103. RU № 2111847 В 25 D 13/00 Электромагнитная машина ударного действия /Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман. – 27.05.98, БИ №15.

104. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Конструктивные схемы импульсных линейных электромагнитных двигателей с динамическим аккумулированием магнитной энергии //Совершенствование технических средств электрического транспорта. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – С. 122-125.

105. Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Способ управления электромагнитным двигателем с динамическим аккумулированием магнитной энергии //Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2000: Труды пятой международной науч.-техн. конф. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2000. – Т.7. – С. 168-170.

106. SU № 1663458 G 01 L 5/00 Устройство для измерения энергии удара / А.А. Перьев, Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин и др. – 15.07.91, БИ №26.

107. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Энергопреобразование в импульсных линейных электромагнитных двигателях при малых рабочих воздушных зазорах //Строительные материалы и технология: Сб. тез. докл. науч.-техн. конф. – Новосибирск, 1997. – С. 78-79.

108. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Электромагнитный привод прессового оборудования при малых рабочих воздушных зазорах //Строительные материалы и технология: Сб. тез. докл. науч.-техн. конф. - Новосибирск, 1997. – С. 81-82.

109. Угаров Г.Г., Мошкин В.И., Усанов К.М. Режимы форсированного накопления магнитной энергии в импульсных электромагнитных двигателях. //Доклады 10-й научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», Екатеринбург, 1995. – С. 30-31.

110. Neyman V.Yu. High technology press equipment with high force and energy parameters but safe for the environment / V.Yu. Neyman, G.G. Ugarov, V.I. Mikheyev // Korus 2002. The 6-th Russia-Korea Intern. Simp, on Science and Technology. - Novosibirsk, Russia: Proc. - Novosibirsk, 2002. -Vol. 1.-P.426-429.

111. RU № 2065360 В 30 В 1/42. Электромагнитный пресс / Г.Г.Угаров, В.Ю. Нейман, И.А.Кудряш и др. – 20.08.96, БИ № 23.

112. Neyman V. Yu. New principles and ways of increase of energy efficiency of seldom-stroke electromagnetic machines // Korus 2002. The 6-th Russia-Korea Intern. Simp, on Science and Technology. - Novosibirsk, 2002. - Vol. 3. - P.159.

113. Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Линейные электромагнитные двигатели с многократным использованием магнитного потока //Импульсный электромагнитный привод: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 110-117.
114. Нейман В.Ю. Проектный расчет электромагнитного двигателя с аксиальным продольно-поперечным потоком // Импульсные линейные электрические машины: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. - Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991.– С. 3-9.
115. RU № 2065659 Н 02 К 33/02 Линейный электромагнитный двигатель/ Г.Г. Угаров, И.А. Кудряш, В.Ю. Нейман и др. – 20.12.93, БИ № 23.
116. Neyman V. Yu., Mikheyev V. I. Electromechanical devices for energy transformation with the periodical structure of a magnetic circuit //Korus 2002. The 6th Russia-Korea International Simposium of Science and Technology. – Novosibirsk, 2002. – Vol. 1. – P. 227-230.
117. Ряшенцев Н.П., Малахов А.П., Малов А.Т. Принцип построения и технико-экономические показатели силовых схем тиристорных преобразователей для привода электромагнитных машин ударного действия //Электрические импульсные системы: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1976. – С. 102-119.
118. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. Mathcad 8 PRO в математике, физике и Internet. – М.: Нолидж, 1999. – 512 с.
119. SU № 1534523 Н 01 F 7/13. Электромагнит постоянного тока / М.А. Терребенин, Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман. – 07.01.90, БИ № 1.
120. Нейман В.Ю., И.А. Кудряш, М.А. Терребенин и др. Новые типы магнитных систем и конструктивных схем электромагнитных ударных машин //Ударные процессы в технике: Тез. Республ. науч.-техн. семинара. – Фрунзе, 1988. – С. 87-88.
121. Нейман В.Ю., Мятаж С.В. Способ питания импульсного электромагнитного двигателя со статическим аккумулярованием магнитной энергии //Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы IV международной науч.-техн. конф. – Новосибирск: НГТУ. – 2002. – Т. 6. – С. 127-131.
122. Малинин В.И., Ряшенцев А.Н., Толстик А.И. Оценка динамического КПД электромагнита с ненасыщенной магнитной системой //Изв. вузов. Электромеханика. – 1989. – № 9. – С. 86-90.
123. Малинин В.И., Ряшенцев А.Н., Толстик А.И. Предельный КПД электромагнита с линейной магнитной системой //Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1991. – №4. – С. 72-76.
124. Ивашин В.В., Плотников С.Б. Энергетические соотношения электромагнита постоянного тока при отрыве якоря внешними силами //Силовые полупроводниковые и импульсные электромеханические преобразовательные устройства: Межвуз. сб. науч. тр. /Под общ. ред. В.В. Ивашина. – Куйбышев: Изд-во КАИ, 1976. – С. 13-16.
125. Бартенев О.В., Морозкина М.В. Исследование эффективности линейного генератора, работающего на зарядное устройство //Электротехника. – 1992. – № 9. – С. 61-63.

126. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
127. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Исследование комбинированных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного типа //Импульсный электромагнитный привод: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 38-44.
128. Никитенко А.Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов. –М.: Энергия, 1983. – 192 с.
129. Селезнев В.А., Живодров В.А., Угаров Г.Г и др. Принципы повышения эффективности импульсных электромагнитных сейсмоисточников малой мощности для исследования малых глубин // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2003. – №1. – С. 28-29.
130. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
131. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
132. Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука, 1987. – 160 с.
133. Малинин В.И., Тюков В.А. Анализ механической работы электромагнитных двигателей //Электричество. – 1996. – №9. – С. 38-41.
134. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д. и др. Электромагнитные силы в динамических процессах электромеханических систем //Электротехника. – 2000. – №5. – С. 43-46.
135. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д. и др. Механическая работа и электромагнитные силы в электромеханических системах //Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. – Вып. 2. – С. 73-82.
136. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
137. Свечарник Д.В. Электрические машины непосредственного привода. Безредукторный привод. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
138. Ряшенцев А.Н. Импульсные электромагнитные машины возвратно-поступательного движения: Дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1990. – 169 с.
139. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. школа, 1980. – 176 с.
140. Емельянов И.Я., Воскобойников В.В., Масленок Б.А. Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 232 с.
141. Каргин В.А. Исследование и создание виброударных машин и технологий. Дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1988. – 343 с.
142. Свечарник Д.В. Линейный электропривод. – М.: Энергия, 1979. –152 с.
143. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
144. Таев И.С. Электрические аппараты. Общая теория. – М.: Энергия, 1977. – 272 с.

145. Ступель Ф.А. Электромеханические реле. – Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1956. – 355 с.
146. Угаров Г.Г., Федонин В.Н., Шамаро В.В. Расчет втяжного короткоходового электромагнита постоянного тока без стопа //Исследование электрических силовых импульсных систем: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 57-62.
147. Михайлов О.П. Электромагнитные и магнитные устройства в станкостроении. – М.: Машиностроение, 1974. – 184 с.
148. Федонин В.Н., Кожевников В.Ю. Электромагнитные прессы (теория и расчет). – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та., 1990. – 80 с.
149. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р. и др. Накопители энергии: Учебное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
150. Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с повышенными силовыми и энергетическими показателями: Дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1992. – 450 с.
151. Шмитц Г., Новотный Д. Введение в электромеханику /Пер. с англ. – М.: Энергия, 1969. – 260 с.
152. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия. 1974. – 392 с.
153. Леви Э., Панцер М. Электромеханическое преобразование энергии. – М.: Мир, 1969. – 556 с.
154. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 504 с.
155. Зельдович Я.Б., Мышкис В.И. Элементы математической физики. –М.: Наука, 1973. – 352 с.
156. Меерович Э.А., Мейерович Б.Э. Методы релятивистской электродинамики в электротехнике и электрофизике. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 232 с.
157. Меерович Э.А. Методы релятивистской электродинамики в электротехнике. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 192 с.
158. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д. и др. К определению статических и динамических усилий электромагнитного двигателя //Электротехника. – 1997. – №9. – С. 28-31.
159. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д. и др. Электромагнитные силы в динамических процессах электромеханических систем //Электротехника. – 1998. – №12. – С. 18-22.
160. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д. и др. Статические и динамические усилия индукционных двигателей //Электротехника. – 1999. – №2. – С. 43-49.
161. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д. и др. Энергетические соотношения и электромагнитные силы в медленно движущихся средах //Электричество. – 2001. – №11. – С. 62-65.
162. Смелягин А.И. Максимальный коэффициент полезного действия электромагнита //Физ.- техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1982. – №4. – С. 119-122.

163. Смелягин А.И. Синтез и исследование машин и механизмов с электромагнитным приводом. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 1991. – 248 с.
164. Ряшенцев Н.П., Ковалев Ю.З. Динамика электромагнитных импульсных систем. – Новосибирск: Наука, 1974. – 188 с.
165. Каргин В.А. Низкочастотные электромагнитные двигатели //Электромагнитные импульсные системы: Сб. науч. тр./ Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1989. – С. 27-33.
166. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 446 с.
167. Нейман В.А. Основы построения и развитие теории импульсных линейных электромагнитных двигателей с повышенными энергетическими показателями: Дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2004. – 581 с.
168. Буйлов А.Я. Основы электроаппаратостроения. – М.: Госэнергоиздат, 1946. – 264 с.
169. Виттенберг М.И. Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи. – М.: ГЭИ, 1956. – 704 с.
170. Усанов К.М., Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган, 2006. – 248 с.
171. Кению Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления /Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
172. Могилевский Г.В. К расчету тяговых сил в электромагнитах //Вопросы электротехнической промышленности. – 1960. – №4. – С. 11-14.
173. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1987. – 231 с.
174. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д. и др. К расчетам энергетических показателей двухфазного асинхронного электродвигателя //Электротехника. – 1997. – №8. – С. 26-30.
175. Мошкин В.И., Угаров Г.Г., Вдовина О.В. Специфические эффекты силовых механических импульсных воздействий на технологические объекты //Проблемы электроэнергетики. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2009. – С. 71-75.
176. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
177. Симонов В.Ф., Кадышев А.И., Кравченко Ю.П. и др. Исследование системы охлаждения электромагнитных молотов //Импульсные линейные электрические машины: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. С. 120-130.
178. Основы теории электрических аппаратов / Под общ. ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высш. шк, 1970. – 600 с.
179. Вундер Я.Ю. Метод расчета температуры нагрева обмотки, работающей в импульсном режиме //Низковольтная аппаратура: Труды ВНИИР, 1974. – С. 110-116.
180. Гутовский М.В., Коршунов В.Ф. Пособие по проектированию и расчету элементов и систем авиационного электрооборудования. – М.: Оборонгиз, 1962. – 165 с.

181. Львицын А.В., Угаров Г.Г., Федонин В.Н. Экспериментальное исследование тепловых процессов штамповочного прессы с линейным электромагнитным приводом //Вопросы динамики механических систем. – Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1983. – С. 65-70.
182. RU № 2031523 Н 02 К 37/00. Шаговый электродвигатель / В.И. Малинин, М.А. Терехин, В.Ю. Нейман. – 20.03.95, БИ № 8.
183. Усанов К.М., Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Конструкции линейных электромагнитных двигателей ударных машин с интегрированными устройствами форсированного аккумулирования магнитной энергии //Научные проблемы мелиорации и электрификации сельского хозяйства в зоне Нижнего Поволжья: Сб. науч. тр.- Саратов, – 1999. – С. 110-118.
184. Нейман В.Ю. Методика предварительной оценки режимов работы электромагнитных ударных машин с учетом допустимой мощности потерь //Электроснабжение, энергосбережение, электрификация и автоматизация предприятий и речных судов. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2001. – С. 54-60.
185. Львович А. Ю. Электромеханические системы. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. – 296 с.
186. Нейман В.Ю., Михеев В.И. О результатах исследования электромагнитных двигателей с периодической структурой магнитной цепи //Электроснабжение, энергосбережение, электрификация и автоматизация предприятий и речных судов. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2001. – С. 44-46.
187. Пеккер И.И., Никитенко А.Г. Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах. – М.: Энергия, 1967. – 168 с.
188. Нейман В.Ю. Максимальная энергия в оптимальном объеме электромагнитной ударной машины с заданной конфигурацией магнитной цепи //Электроснабжение, энергосбережение, электрификация и автоматизация предприятий и речных судов. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2001. – С. 171-178.
189. Малов А.Т., Угаров Г.Г. Экспериментальные статические тяговые характеристики силового электромагнита постоянного тока с плоской формой воздушного зазора //Электрические машины ударного действия. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1969. – С. 141-145.
190. Ротерс Г.К. Электромагнитные механизмы. – М.: Энергоиздат, 1949. – 522 с.
191. Нейман В.Ю., Г.Г.Угаров. О предельной энергии в объеме электромагнитной ударной машины //Электроснабжение, энергосбережение, электрификация и автоматизация предприятий и речных судов. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2001. – С. 60-64.
192. Нейман В.Ю. К вопросу расчета предельных выходных параметров линейных электромагнитных машин для импульсных технологий //Челябинскому агроинженерному университету 70 лет: Тез. докл. 40-й науч.-техн. конф.- Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2001. – С. 238-239.
193. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. – М.: Академия, 2005. – 336 с.

194. Ашавский А.М., Вольперт А.Я., Шнейнбаум В.С. Силовые импульсные системы. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.

195. Веселовский О.Н. Линейные электродвигатели переменного тока для производственных механизмов и автоматических устройств //Электротехника. – 1977. – №6. – С. 12-15.

196. Нейман В.Ю. Оценка режимов работы электромагнитных ударных машин с учетом теплоотдачи //Электроснабжение, энергосбережение, электрификация и автоматизация предприятий и речных судов. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2001. – С. 42-44.

197. Нейман В.Ю., Михеев В.И. Оценка эффективности и принципы построения конструкций приводных электромагнитов с многократной модуляцией магнитного потока //Совершенствование технических средств электрического транспорта: Сб. научн. тр. – Новосибирск: НГТУ, 2001. – Вып. 3. – С. 66-70.

198. Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. О максимальной скорости движения якоря в линейном электромагнитном преобразователе с продольным магнитным потоком //Электроснабжение, энергосбережение, электрификация и автоматизация предприятий и речных судов. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2001. – С. 64-67.

199. Нейман В.Ю. Приближенная оценка показателей линейных электромагнитных машин в динамических режимах с заданной конфигурацией магнитной цепи //Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001.– С. 110-111.

200. Нейман В.Ю., Михеев В.И. Способ питания низкочастотных электромагнитных машин ударного действия //Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – С. 148-149.

201. Нейман В.Ю., Угаров Г.Г., Усанов К.М. и др. Сравнительный анализ конструктивных схем ударных машин с электромагнитным приводом //Совершенствование технических средств электрического транспорта: Сб. науч. тр. – Новосибирск: НГТУ, 2001. – Вып.3. – С. 171-175.

202. Петленко Б.И. Линейный электропривод и тенденция его развития //Электричество. – 1981. – №9. – С. 43-47.

203. Нейман В.Ю. Математическая модель линейного электромеханического преобразователя с двумя рабочими воздушными зазорами //Совершенствование технических средств электрического транспорта: Сб. научн. тр. – Новосибирск: НГТУ, 2001. – Вып. 3. – С. 136-141.

204. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах //Электротехника. – 2002. – №2. – С. 30-36.

205. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Физические характеристики поляризованных сред, обусловленные релаксационными процессами //Электротехника. – 2003. – №.9 – С. 10-14.

206. Нейман В.Ю. Режимы форсированного аккумулярования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях //Научн. вестн. НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – № 1(14). – С. 105-112.

207. Ряшенцев Н.П., Малов А.Т., Угаров Г.Г. Сравнение втяжных электромагнитов постоянного тока одного веса //Исследование электрических машин возвратно-поступательного движения: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1969. – Ч. 1 – С. 32-38.
208. Kallenbach E. Der Gleichstrommagnet. – Leipzig: Academische Verlags-gesellschaft Geest & Portig K. – G, 1969. - 180 p.
209. Кудряш И.А., Терехин М.А., Угаров Г.Г. К выбору длины обмотки линейных электромагнитных двигателей с комбинированным якорем и двумя рабочими воздушными зазорами //Электромагнитные импульсные системы: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1989. – С. 89-93.
210. Москаленко В.В. Электродвигатели специального назначения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 104 с.
211. Нейман В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий //Электротехника. – 2003. – №.9 – С. 25-30.
212. Казаков Л.А. Электромагнитные устройства радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1978 – 168 с.
213. Казаков Л.А., Кончаловский В.Ю. Оптимальные соотношения размеров магнитопровода силовых электромагнитов постоянного тока //Электричество.- 1964. – №10. – С. 23-26.
214. Малинин В.И., Ряшенцев А.Н. Оптимальная геометрия электромагнитного модуля машины ударного действия //Электромеханика. – 1989. – №4. – С. 84-88.
215. Бугаев Г.А. О критериях для оценки электромагнитов //Электричество. – 1966. – №11. – С. 51-55.
216. Ряшенцев Н.П., Ямпольский Ю.Г., Кибрик Ю.И. и др. О проектировании оптимальных ЭМВПД //Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1974. – №2. – С. 72-77.
217. Тимошенко Е.М., Фадин Ю.И. Силы сопротивления движению якоря в электромагнитных двигателях возвратно-поступательного движения //Электромагнитные машины возвратно-поступательного движения: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1971. – С. 76-82.
218. Перьев А.А., Осокин А.Л., Андреев И.В. Повышение точности измерения энергии удара электромагнитных машин ударного действия // Импульсный электромагнитный привод: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1971. – С. 57-63.
219. Фадин Ю.И., Тимошенко Е.М. О расчете сопротивления контура вихревых токов в якоре электромагнитных двигателей возвратно-поступательного движения // Электрические импульсные системы: Сб. науч. тр. / Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1976. – С. 42-46.
220. Ардашников Т.И. Асинхронный электропривод с упругим накопителем энергии //Электротехника. – 1990. – №8. – С. 43-45.

221. Никитенко А.Г., Бахвалов Ю.А., Щербаков В.Г. Аналитический обзор методов расчета магнитных полей электрических аппаратов //Электротехника. – 2002. – №3. – С. 30-34.
222. Бритков Н.А., Малахов А.П., Ряшенцев Н.П. и др. Электромагнитный импульсный сейсмоисточник малой мощности //Электромагнитные импульсные системы: Сб. науч. тр. / Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1989. – С. 160-166.
223. Шевченко С.М. Движение и удары в электрических аппаратах автоматического управления. – М.: Энергия, 1974. – 144 с.
224. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.
225. Перьев А.А. Совершенствование методов и средств измерения энергетических параметров электромагнитных машин ударного действия //Электромагнитные импульсные системы: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1989. – С. 13-26.
226. SU № 1663458 G 01 L 5/00 Устройство для измерения энергии удара /А.А. Перьев, Н.А. Бритков, Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин. 15.07.91, БИ № 26.
227. RU № 1425552 G 01 P 3/08 Устройство для измерения энергии удара бойка /А.А. Перьев, И.Ф. Куликов, Е.М. Тимошенко, А.Л. Осокин. 12.03.88, БИ № 35.
228. Фетисов В.В., Седова И.Ю. Анализ параметров эквивалентных вихревых контуров при произвольных геометрических характеристиках массивных участков магнитопровода //Изв. вузов. Электромеханика. – 1989. – №10. – С. 65-71.
229. Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку //Электротехника. – 1990. – №10. – С. 35-36.
230. Симонов Б.Ф., Кадышев А.И. Силы сопротивления движению бойка электромагнитных молотов от вихревых токов в направляющей //Электромагнитные импульсные системы: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1989. – С. 81-89.
231. Ардашников Т.И., Очков В.Ф. Mathcad 7 PRO для студентов и инженеров. – М.: Компьютер ПРЕСС. – 1988. – 384 с.
232. Малов А.Т., Симонов Б.Ф., Носовец А.В. Пути повышения скорости бойка электромагнитных машин ударного действия // Электромагнитные машины ударного действия: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1978. – С. 46-52.
233. Ефимов И.Г., Тихонов В.И. Линейный электромагнитный привод как система с периодической сменной структурой //Изв. вузов. Электромеханика. – 1989. – №11. – С. 72-79.
234. Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Сравнительный анализ силовых цилиндрических электромагнитов для привода машин с ограниченным внешним диаметром. – Новосибирск: Деп. в ВИНТИ. – 1989, № 5115-В89. – 20 с.
235. Усанов К.М., Львицын А.В. Исследование динамики переносных молотов //Импульсные линейные электрические двигатели: Сб. науч. тр. /Под общ.

ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 65-73.

236. Щучинский С.Х. Электромагнитные приводы исполнительных механизмов. – М: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

237. Афонин А.А., Билозор Р.Р., Гребеников В.В. и др. Электромагнитный привод робототехнических систем. – Киев: Наукова думка, 1986. – 272 с.

238. Новожилов Г.Ф. Бездефектное погружение свай в талых и вечно мерзлых грунтах. – Л.: Стройиздат, 1987. – 112 с.

239. Гринченков В.П., Никитенко Ю.А., Медведев В.В. Аналитическая оценка влияния вихревых токов на время трогания нейтральных и поляризованных электромагнитов при включении //Изв. вузов. Электромеханика. – 1998. – №5/6. – С. 34-37.

240. Гаранин А.Ю., Силаева Е.В., Шлегель О.А. и др. Расчет тягового усилия электромагнита постоянного тока //Электротехника. – 2003. – № 02/03. – С. 55-57.

241. Никитенко А.Г., Краснов Е.Н., Лобов Б.Н. и др. Оптимизация геометрии электромагнитных захватов корпусосборочных устройств //Изв. вузов. Электромеханика. – 1990. – №9. – С. 66-70.

242. Мастяев Н.З., Трегубов В.А., Ширинский В.С. Оптимальное проектирование электромагнитов постоянного тока броневого типа //Изв. вузов. Электромеханика. – 1987. – №1. – С. 69-73.

243. Львицин А.В., Угаров Г.Г., Федонин В.Н. Силовые приводные электромагниты цилиндрической структуры с высокими удельными показателями //Электромагнитные машины ударного действия: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1978. – С. 27-34.

244. Любчик М.А. Динамическая эффективность электромагнитных механизмов //Электричество. – 1972. – №5. – С. 48-54.

245. RU № 59343 U1 Н 02 К 41/03 Линейный шаговый электромагнитный двигатель /В.И. Мошкин, К.М. Усанов, А.В. Волгин и А.В. Львицын. 10.12.06. БИ № 34.

246. Карасев В.А. Влияние вихревых токов на переходные процессы в электромагнитах //Электричество. – 1963. – №3. – С. 33-37.

247. Карасев В.А. Расчет динамических режимов электромагнитов //Электричество. – 1964. – №3. – С. 39-44.

248. Тимошенко Е.М., Фадин Ю.И., Королев И.М. К расчету электромагнитных двигателей возвратно -поступательного движения с учетом вихревых токов и насыщения магнитопровода //Электромагнитные машины возвратно-поступательного движения: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. - Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1971.-С. 53-64.

249. Бочкарев И.В. Повышение быстродействия замыкания электромеханических тормозных устройств для электродвигателей //Электротехника. – 2003. – №02/03. – С. 58-62.

250. Шалыгин И.В., Кравченко К.Ф., Киреев О.П. и др. Исследование тяговых характеристик электромагнитных приводов импульсного действия //Изв. вузов. Электромеханика. – 1966. – №7. – С. 773-780.

251. Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Анализ статических тяговых характеристик магнитных систем линейных электромагнитных двигателей с многократным использованием магнитного потока //Электромагнитные импульсные системы: Сб. науч. тр. /Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1989. – С. 102-107.
252. Павленко А.В., Гринченков В.П., Беляев Н.П. и др. Проектирование быстродействующих электромагнитов с заданными динамическими параметрами //Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. – №4 – С. 76-37.
253. Тулин А.С. Обобщенные условия соразмерности электромагнитных систем //Автоматика и телемеханика. – 1960 – №3 – С. 374-383.
254. Любчик М.А. Проектирование силовых электромагнитов по заданным условиям срабатывания //Электротехника. – 1970. – №12. – С. 46-48.
255. Ивашин В.В., Милорадов И.А. О максимальной скорости движения ферромагнитного якоря при однократном процессе электромеханического преобразования энергии //Электромеханика. – 1986. – № 1. – С. 91-94.
256. Лавров В.М. Теория электромагнитного поля и основы распространения радиоволн. – М.: Связь, 1964. – 368 с.
257. Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г., Тригубович Г.М. Математическое моделирование процесса становления осесимметричного поля вертикальной электрической линии //Сибирский журнал индустриальной математики. – 2003. – Т.6. – №2(14). – С. 107-125.
258. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
259. Шурина Э.П., Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э. Решение трехмерных нелинейных магнитостатических задач с использованием двух потенциалов. – Новосибирск, 1996. – 28 с. (Препринт / РАН. Сиб. отд-ние. ВЦ; № 1070).
260. Персова М.Г. Моделирование нестационарных электромагнитных полей на нерегулярных прямоугольных сетках //Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – № 3. – С. 33-38.
261. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем. – М.: Мир, 1991. – 367 с.
262. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
263. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Одномерные волновые уравнения в движущихся элементах электромеханики //Научн. вестник НГТУ. – Новосибирск: НГТУ. – 2003 – № 1(14). – С.93-103.
264. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Рабочий цикл электромагнитной ударной машины двойного действия с аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах //Электроснабжение, энергосбережение, электрификация и автоматизация предприятий и речных судов. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2001. – С. 47-54.
265. Нейман В.Ю. Исследование процессов передачи механической мощности в линейных преобразователях электромагнитного типа //Электроэнергетика электромеханические системы и комплексы: Сб. науч. тр. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 259-262.

266. Рояк М.Э., Соловейчик Ю.Г., Шурина Э.П. Сеточные методы решения краевых задач математической физики: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 120 с.
267. Плоткин С.М. Комплексная механизация на предприятиях радиопромышленности и приборостроения. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
268. Волосатов В.А. Элементы пневмопривода. – Л.: Машиностроение, 1975. – 134 с.
269. Запрягаев М.И., Крылов Л.В., Магидович Е.И. и др. – Армейские автомобили: Конструкция и расчет. – М.: Воениздат, 1979. – Ч.2. – 479 с.
270. Александров М.П., Лысяков А.Г., Федосеев В.Н. и др. Тормозные устройства: Справочник /Под ред. М.П. Александрова. – М.: Машиностроение, 1985. – 312 с.
271. Петленко Б.И. Приводы поступательного перемещения и их выбор //Вестник машиностроения. – 1982. – №7. – С. 19-22.
272. Викторов О.А. Электромагнитные двигатели для замкнутых линейных приводов: Дис. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛПИ. 1989. – 170 с.
273. Луценко В.Е., Рубцов В.П. Электропривод с шаговыми двигателями. – М.: ВИНТИ, 1978. – 124 с.
274. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1974. – 839 с.
275. Подъемно-транспортное оборудование. Каталог-справочник. Редукторы двухступенчатые. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1965. – 356 с.
276. ГОСТ 19028-73. Насосы и агрегаты трехплунжерные кривошипные.
277. Федулов А.И., Архипенко А.П. Анализ показателей гидропневмоударных устройств //ФТПРПИ. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1986. – №4. – С. 112-115.
278. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия, 1982. – 256 с.
279. Веселовский О.Н. Низкоскоростные линейные электродвигатели: Дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1979. – 366 с.
280. Кудараускас С.Ю. Синхронные двигатели колебательного движения: Дис. ... докт. техн. наук. – Клайпеда, 1977. – 299 с.
281. Штурман Г.И. Индукционные машины с дуговыми и плоскими статорами //Сборник научно-технических статей ХЭТИ. – М.: Госэнергоиздат, 1969. – С. 178-200.
282. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
283. Коровяковский И.Т. Приводы к выключателям высокого напряжения. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 200 с.
284. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
285. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
286. Артоболевский С.И. Привод - основной структурный элемент современной технологической машины: Тезисы докладов. – М.: 1959. – С. 9-13.

287. Туровский П.С., Фролов А.В. Расчет, конструирование и создание электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Изд-во АН Кирг. ССР, 1984. – 129 с.
288. Пеккер И.И., Никитенко А.Г. О предельной и фактической работоспособности электромагнитов //Известия вузов. Электромеханика. – 1960.- №11. – С. 394-400.
289. Сипайлов Г.А., Фролов А.В., Туровский П.С. и др. Электрические силовые импульсные системы //Сборник научных трудов Фрунзенского политехнического ин-та . – Фрунзе, 1974. – С. 132-148.
290. Елифанов А.П. Электромеханические преобразователи энергии. – СПб.: Лань, 2004. – 208 с.
291. Горбунов В.Ф., Лазуткин А.Г., Ушаков Л.С. Импульсный гидропривод горных машин. – Новосибирск: Наука, 1986. – 198 с.
292. Ряшенцев Н.П., Сбоев В.М. Классификация электромагнитных машин возвратно-поступательного движения //Исследование электрических машин возвратно-поступательного движения. – Новосибирск: Наука, 1969. – С.3-13.
293. RU №1435708 E O2 D 7/06 Электромагнитный молот /Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, М.А. Терехенин. – 12.02.88, БИ № 41.
294. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
295. Сермонж Г.Я. Динамика твердых тел в электромагнитном поле. – Рига: Зинатне, 1974. – 248 с.
296. Литовченко С.С. Исполнительные устройства как механизмы, изменяющие силовые поля //Техника средств связи: Серия ТПС. – М.: Связь, 1985. – Вып. 7. – С. 98-109.
297. Литовченко С.С., Золотарев В.Ф. Введение неоднородности в силовые поля исполнительными устройствами и вариационные принципы механики //Техника средств связи: серия ТПС. – М.: Связь, 1987. – Вып. 7. – С. 110-115.
298. Ряшенцев Н.П., Кибрик Ю.И., Малов А.Г. и др. Влияние конструкций направляющих устройств на энергетику электромагнитных ударных узлов //Исследование электрических машин возвратно-поступательного движения. – Новосибирск, 1961. – Ч. 2. – С. 120-125.
299. Лабзин М.Д. Судовые электроприводы с шаговыми электродвигателями. – Л.: Судостроение, 1971. - 280 с.
300. Бертинов А.И., Угаров Г.Г. Экспериментальные машины с катящимся ротором.- М.: Энергия, 1969. - 200 с.
301. Польшиков С.А., Угаров Г.Г. Обобщенные уравнения динамики импульсных линейных электромагнитных двигателей //Динамические задачи электромеханики. – Омск: Изд-во ОмПИ, 1990. – С. 144-147.
302. Польшиков С.А., Угаров Г.Г. Оптимизация процесса трогания линейных электромагнитных двигателей //Задачи динамики электрических машин. – Омск: Изд-во ОмПИ, 1989. – С. 99-107.

Научное издание

Мошкин Владимир Иванович
Нейман Владимир Юрьевич
Угаров Геннадий Григорьевич

ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

МОНОГРАФИЯ

Редактор Н.М. Быкова

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. №1
Печать трафаретная	Усл. печ.л. 13,75	Уч. изд.л. 13,75
Заказ	Тираж	Цена свободная

РИЦ Курганского государственного университета.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.