

Советский фонд мира
Центр „Звездный мир“

Технические
средства для разгона
до 10 км/с

Руководитель темы
ПОЛЯШОВ Л.И.

Москва-Гомель

989

УТВЕРЖДАЮ

Директор Центра "Звездный мир"

А.Э. Юницкий

" 20 " 01 1989 г.



АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ
РАЗГОН ОБЪЕКТА НЕОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ В
ВАКУУМНОМ КАНАЛЕ ДО СКОРОСТИ 10 КМ/С
(дог. N 16/ОТС)

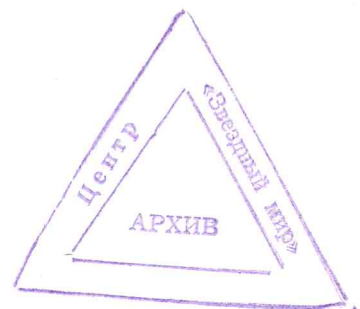
Руководитель
творческого коллектива

Поляшов
200189

Л.И. Поляшов

Заказчик: Центр "Звездный мир"
Работа выполнена за счет средств,
выделенных Советским фондом мира на
совместную программу "Звездный мир"
(Пост. бюро Правления Советского
фонда мира от 25 мая 1988 г.
N 34-88/6)

Москва-1989 г.



Содержание	стр.
Введение	2
1. Электродинамические установки для разгона тел до 10 км/с	4
2. Современные и перспективные высокоскоростные транспортные средства	16
3. Выбор варианта и расчет двигателя ОТС	33
3.1. Вводные замечания и некоторые примеры	
3.2. Технический уровень линейных двигателей и предложения по его повышению	
3.3. Возможные варианты двигателей ОТС	
3.4. Методические основы расчета и проектирования двигателя ОТС	
3.5. Расчет асинхронного двигателя ОТС	
3.6. Расчетная записка	
4. Схемы электропитания, возможные варианты преобразователей частоты, вопросы пуска электропривода ОТС	59
5. Перспективные типы накопителей для систем разгона	81
6. Вопросы моделирования системы разгона. Расчетная оценка физических моделей двигателя ОТС	88
7. Вопросы рекуперации энергии и торможения электропривода ОТС	100
Заключение	103
Литература	106
Приложение (отдельный том)	

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа выполнена по инициативе Центра "Звездный мир" и группы специалистов других организаций с целью определения принципиальной возможности создания подсистемы электропривода Общепланетной транспортной системы (ОТС), являющейся наряду с подсистемой магнитного подвеса главным техническим средством для осуществления разгона ротора с полезным грузом до скорости 10 км/с.

Ознакомление с основными техническими требованиями к ОТС, сформулированными директором центра "Звездный мир" А.Э.Юницким, побудило авторов настоящего отчета рассмотреть прежде всего существующий технический уровень разработок по системам разгона макротел до сверхвысоких скоростей, а также по высокоскоростному наземному транспорту на магнитном подвесе (разделы 1 и 2).

Рассмотрение проблем, связанных с созданием этих весьма сложных систем, является, на наш взгляд, обязательным с точки зрения выявления научно-технических и технологических решений, которые можно использовать в программе создания ОТС.

При выборе структуры и схем электропривода и типа двигателя мы, в основном, ориентировались на наиболее разработанные варианты с тем, чтобы показать, что уже в настоящее время можно приступить к расчету и проектированию отдельных подсистем ОТС, в частности к созданию физических модулей, которые одновременно могут быть использованы для народохозяйственных целей, например, в качестве гипернакопителей в энергетике (разделы 6 и 7).

Особое внимание при этом уделено возможным схемам и типам преобразователей и выбранному асинхронному двигателю для электропривода ОТС. Нам представляется, что несмотря на "традиционность" такого выбора, возможности двигателя асинхронного типа работающего в частотно-регулируемом режиме тяги, не исчерпаны, если к тому же ориентироваться на применение новых компенсирующих устройств и накопителей энергии на основе бурно развивающейся в СССР и за рубежом технологии конденсаторов с двойным электрическим слоем, использование высокотемпературной сверхпроводимости и других достижений научно-технического прогресса. Здесь прогнозируется качественный рывок к предельному уровню энергетических показателей электропривода (разделы 3,4,5).

Учитывая, что настоящая работа является первой попыткой схемно-технического и расчетного анализа подсистемы электропривода ОТС, предпринятой в условиях отсутствия достаточной информации по другим подсистемам, расчеты и рекомендации по проектированию следует рассматривать как предварительные. По мере проработки других подсистем они должны уточняться на основе системного анализа. Кроме того, сведения, приведенные в отчете, могут быть полезны в разработках по программе "Микрогравитрон".

Следует отметить, что глобальность и многоплановость проблем создания ОТС и системы "Микрогравитрон" может придать сильный импульс научно-техническому прогрессу в энергетике, электроприводе, электромашиностроении и других отраслях.

С другой стороны, нетрадиционные подходы к проблемам должны стимулировать, как показывают уже выполненные проработки ОТС, "работу умов", что само по себе актуально в условиях происходящей перестройки и перехода к новому мышлению.

Некоторые расчетные оценки указывают на "приземленность" нынешнего уровня самых передовых достижений, ограниченность научно-технического потенциала нашей планеты, если подходить с позиции освоения космического пространства.

И поэтому уже сейчас при наблюдающихся кризисных явлениях в развитии энергетики и электротехники нужно интенсифицировать поиск и исследования принципиально новых генерирующих устройств, средств разгона и движения тел, передачи и накопления энергии и др.

Это понадобится и на Земле и в космосе.

Работа выполнена творческим коллективом под руководством А.П.Поляшова и распределена между его членами следующим образом: В.Г.Ефимов, В.Ф.Мольков, А.Н.Никитин, Е.В.Подгузова-поиск, отбор, и подготовка информационных, патентных и иллюстрационных материалов, оформительские работы; Л.И.Поляшов-введение, разделы 1,3,4 (в части электромеханических преобразователей), 5,6,7, заключение, общее редактирование отчета; Н.И.Радионон-разделы 4,7; Ю.Д.Соколов-разделы 1,2; А.Э.Юницкий-разработка технических требований, консультации, обсуждение результатов.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность работникам института "Информэлектро" во главе с В.С.Дмитриевым за предоставление некоторых информационных материалов.

За рубежом в поисках путей обеспечения надежного замыкания цепи движущимся телом в широком диапазоне скоростей рассматривают варианты использования комбинированного плазменно-металлического контакта, а также металлического контакта, который при достижении телом скорости 5-7 км/с превращается в плазменную перемычку.

Для нормального функционирования ускорителя должны быть обеспечены целостность тела, которое в процессе ускорения подвергается большим механическим нагрузкам. Как показали проведенные за рубежом исследования, к телу в канале ствола могут быть кратковременно приложены усилия, значительно превышающие предел текучести материалов, из которых изготовлено тело, что приводит к его разрушению (рис. 6). Поэтому одним из требований к источникам питания и схеме формирования импульсов является прекращение тока в направляющих до момента вылета тела или уменьшение тока до величины, при которой электродинамические усилия, действующие на тело, не превосходят допустимые.

Теоретический предел коэффициента полезного действия рельсовых электромагнитных ускорителей не превышает 50%. Зарубежные специалисты считают, что технически достижимый КПД этого типа ускорителей составляет 30%. Эффективность рельсовых ускорителей может быть увеличена при применении сверхпроводящих катушек для усиления магнитного поля ускоряющей системы. Имеются проекты создания ускорителей со сверхпроводящими катушками, КПД которых достигает 45%.

Современный уровень развития рельсовых ускорителей, за рубежом отражается в созданных в последние годы экспериментальных образцах. Характеристики некоторых образцов приведены в табл. 1.

Одними из первых в 60-е годы продемонстрировали возможность разгонять тело массой в 1 г с ускорением 2000g сотрудники Австралийского государственного университета в г. Канберре. Используемый униполярный генератор имел возможность запасать 500 МДж энергии. При проведении исследований было обнаружено, что при определенных условиях электрическая дуга обходит тело, оставляя его позади. Дальнейшие исследования были направлены на изучение этого явления. После первых же экспериментов обнаружилось также разрушающее действие токосъемного устройства вследствие высокой плотности тока.

Центром исследований и развития фирмы "Вестингауз" в 1979 году были развернуты работы по созданию лабораторной демонстрационной пусковой установки, которая подвергнута испытаниям серией из пяти пусков для оценки характеристик системы. В качестве первичного источника питания был выбран униполярный генератор.

Описание системы и заданных параметров для УР и источника питания приведены в табл. 2.

Основные характеристики экспериментальных
рельсовых электромагнитных ускорителей

Характеристики	ЭДУ Ливерморской национальной лаборатории (США)		ЭДУ Лос-Аламосской национальной лаборатории (США)			ЭДУ Токийского технологического института (Япония)
Наименование образца						
Длина ускоряющей секции, м	1,65	5,2	1,2	1,85	1,5	2
Количество секций, шт	1	1	9	ок.10	1	1
Общая длина канала, м			13	22		
Диаметр канала, мм	13,3	12,8	ок.12	25	100	10
Масса снаряда, г	4,0	1,0	1,0	20-30	600	1
Удельная индуктивность, мкГн/м	0,34	приблиз.	0,3	пр. 0,3	0,35	0,25
Энергия источника питания полная (использованная в эксперименте)	625(230)	625	80000			600(137)
Рабочее напряжение, кВ	3,0	5,0	6,0			6,0
Максимальный ток, кА	350	345	550-600	1000- -1300	2600	
Скорость ввода тела в УР км/с	0,72	1,23	0,35	5-7	0	0,4-0,6
Скорость схода с направляю- щих, км/с	3,0	6,6	11	12-15	1-2	4,0
КПД ускорителя, %	16,7	6,3	18			

1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАЗГОНА ТЕЛ ДО 10 КМ/С И ИХ СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В последние годы за рубежом интенсивно ведутся работы по созданию электродинамических ускорителей /ЭДУ/ макротел, результаты которых наряду с успехами в области разработки импульсных источников электроэнергии и коммутирующих устройств, сделали реальными создание электромагнитных пусковых установок-электрических систем, в которых ЭДУ используется в качестве исполнительного устройства.

Электродинамические ускорители предназначены для преобразования электрической энергии, поступающей от источников питания, в кинетическую энергию метаемых тел. По принципу действия ЭДУ представляют собой линейные электродвигатели импульсного действия и подразделяются на кондукционные, индукционные и соленоидные ускорители.

Конструктивные отличия ЭДУ состоят в первую очередь в устройстве ускоряющей электромагнитной системы метаемого тела.

Ведущиеся за рубежом работы в области ЭДУ ориентированы, в частности, на использование их для вывода объектов в космос и коррекции траекторий космических аппаратов. В США значительное место отводится работам по созданию ЭДУ военного назначения в рамках программы СОИ.

В ходе ведущихся за рубежом работ в этой области осуществляется проектирование различных ускорителей, предназначенных для разгона тел массой от нескольких грамм до сотен кг и сообщение им скорости от нескольких сотен м/с до нескольких км/с и более.

Создание ЭДУ за рубежом находится в настоящее время на стадии исследований и экспериментальных разработок. При этом наибольшее развитие получили рельсовые ускорители, при проектировании, изготовлении и экспериментальном исследовании которых накоплен значительный опыт. В последние годы расширяются также проработки других типов ЭДУ [1,7-25].

Кондукционные /рельсовые/ электромагнитные ускорители

Рельсовый ускоритель /УР/ представляет собой работающий в импульсном режиме линейный двигатель постоянного тока, якорем которого является тело,двигающееся по токонесущим направляющим под действием сил Лоренца (рис. 1).

Сила F , которая вызывает ускорение тела, является результатом воздействия магнитного поля, создаваемого током I , проходящего по направляющим через подвижной контакт тела, на ток в нем. Ее величина равна

$$F = 0,5 h_x I^2, \text{ при } h_x = \frac{h}{l} x = h_l x$$

где h , h_x и h_l - соответственно полная, текущая и погонная индуктивность ускоряющей системы.

В канале УР под воздействием высоких электромагнитных нагрузок происходит вынос металла с поверхности токонесущих элементов, что вызывает их эрозию, создает условия для дугообразования и формирования вторичных плазменных перемычек в канале ствола, шунтирующих подвижной контакт тела. Это приводит к существенному снижению силы, действующей на тело, уменьшает эффективность ЭМП. [1]

2

Вследствие этих причин предпринятые за рубежом попытки увеличения тока в направляющих привели к значительному отклонению фактической скорости (V_f) снаряда от расчетной (V_p) при $V_p > 5 \pm 7$ км/с в сторону ее уменьшения (рис. 2).

Наибольшей эрозии и механическим воздействиям подвергается начальный участок направляющих, где время воздействия разрушающих факторов относительно велико вследствие невысокой скорости тела на этом участке.

Для уменьшения механической деформации элементов конструкции и исключения дугообразования используют схемы распределенного ввода энергии к ускорителю и контуры подмагничивания. Эти технические решения позволяют уменьшить величину тока в направляющих при сохранении силы, действующей на тело.

Для увеличения скорости тела при существующих ограничениях на величину тока в направляющих разработаны проекты ускорителей со стволом большей длины (до нескольких сот метров).

В состав УР помимо направляющих может включаться контур усиления магнитного поля (подмагничивания).

Ограничение тепловых потерь в этих проектах осуществляется путем распределенного ввода энергии в ускоряющую систему, при котором источник питания последовательно подключается к расположенным друг за другом участкам направляющих рельс. На рис. 3 показан один из вариантов схем распределенного ввода энергии с общим источником питания. В многокаскадных ускорителях предусмотрено автономное питание каждой ступени ускорения (рис. 4).

Управление коммутационной аппаратурой в схемах питания с распределенным вводом энергии осуществляется по сигналам магнитных или оптических датчиков положения тела в канале ствола.

Реализация технических возможностей УР во многом зависит от надежности контакта тела с направляющими. Функции подвижного контакта выполняют металлические элементы тела или плазменная перемычка (плазменный "поршень"), образующаяся при протекании большого по величине тока по металлической фольге или тонкому проводнику. Протекание сильного тока по подвижному контакту вызывает появление некоторой тормозящей силы, (в случае плазменной перемычки ее называют силой вязкого трения) уменьшающей действие на тело электродинамической силы. По оценке зарубежных специалистов, эта тормозящая сила поглощает 30-50% или до 15% электродинамической силы при использовании металлического контакта или плазменной перемычки соответственно.

При высоких скоростях движения тела плазменная перемычка более надежна по сравнению с металлическим контактом. Однако при сильной эрозии поверхности направляющих отмечается увеличение массы плазменной перемычки за счет захвата в нее металлических элементов, вынесенных магнитным полем в канал, что приводит к ее неустойчивой работе, расслоению и увеличению вязкого трения. При деформации направляющих или их износе имели случаи выхода части плазмы в пространство перед движущимся телом, что также уменьшает эффективность ускорителя.

Зарубежные специалисты считают, что металлический контакт надежно работает при скорости тела до 1,5-2 км/с и при скоростях до 5-6 км/с сохраняют некоторое преимущество перед плазменной перемычкой. Однако при этих высоких скоростях уменьшается вероятность надежной работы металлических контактов вследствие возможного дугообразования, особенно при деформации направляющих электродов и их износе.

Таблица 2

Заданные характеристики	
1. Параметры установки УР:	
разгоняемая масса, г	300
максимальная величина ускорения, м/с ²	$1,5 \times 10^6$
скорость, км/с	3
длина разгонной части, м	4
2. Источник питания:	
накапливаемая энергия, МДж	15
пиковый ток, МА	1,5
Параметры элементов системы	
Униполярный генератор	
-энергия, МДж	17,5
-напряжение, В	106
-ток (номинальный), МА	1,5
-сопротивление (активное), МКОМ	5,5
Накопительная обмотка	
-сопротивление (постоянному току), Ом	9,6
-индуктивность, МКГН	4,5
Подводящие шины	
-сопротивление, МКОМ	16
-индуктивность, МКГН	0,5

В Ливерморской национальной лаборатории им. Лоренса (США) в 1982 г. после проведения теоретических исследований начата разработка экспериментального образца УР. Этот ускоритель должен обеспечивать разгон тел массой 1 г в вакуумных камерах до скорости 12 км/с. При проведении экспериментов в качестве источников питания использовались конденсаторная батарея, способная накапливать энергию 625 кДж.

В США по программе NYVAX также разрабатывается рельсовый ускоритель для электрофизической установки. Проведены два этапа экспериментов: с двумя и семью ускоряющимися секциями; при максимальном токе до 210 кА скорость составляла соответственно 3,08 км/с и до 11 км/с. На третьем этапе создания ускорителя планируется, после доработки конструкции до ускоряющих секций, достичь скорости метания 25 км/с.

На первых двух этапах экспериментов для питания ускорителя использовалась конденсаторная батарея, на третьем этапе предполагается использовать генератор энергии со сжатием магнитного потока.

В Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) разработан и испытывается односекционный ускоритель HIMASS, потребляющий при работе мегаамперные токи (до 3-4 МА). Оболочка ствола этого ускорителя выполнена из композиционного материала (кевлар) и имеет форму сплюснутой трубы.

В процессе испытаний этого ускорителя отмечена значительная упругая деформация направляющих электродов (до 5 мм) при пуске, что явилось причиной прорыва плазмы в полость канала ствола перед ускоряемым телом. При доработке этого ускорителя предполагается использовать металлический контакт вместо плазменной перемычки.

В Токийском технологическом институте ведется разработка УР для физических исследований. Программой работ предусмотрено создание однокаскадного ускорителя и разработка на его основе двухкаскадного.

В последующем предполагается создание многокаскадного ускорителя, обеспечивающего разгон тела массой 1г до скорости 150 км/с. В настоящее время создан и испытывается однокаскадный ускоритель (см. табл 2.). При подключении его к источнику питания (конденсаторной батарее) с накопленной энергией 80 кДж снаряд разогнался до скорости 2 км/с, а при 137 кДж-до 4 км/с.

Характеристики обеих секций двухкаскадного ускорителя были приняты равными; активное сопротивление направляющих электродов каждой секции равно 3 мОм, остальные характеристики приведены в табл.2. Параметры схемы источника питания :

$R_0=3,5$ мОм;
 $L_0=0,15$ мкГн

Другие расчетные характеристики двухкаскадного ускорителя и его источников питания (конденсаторных батарей) приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расчетные характеристики двухкаскадного ускорителя Токийского технологического института

Характеристики	Первая ступень	Вторая ступень
энергия источника питания кДж	216	294
напряжение, кВ	3	7
максимальный ток, КА	490	760
скорость ввода тела УР, км/с	1,5	6
скорость ввода снаряда с направляющих, км/с	6	11,6
длительность импульса (время прохождения телом секции), мс	0,4	0,12

Расчетные параметры многокаскадного ускорителя, приходящиеся на единицу длины, существенно не отличаются от соответствующих характеристик двухкаскадного ускорителя. Падение напряжения в плазменной перемычке составляет 200В. Суммарная энергия источников питания равна 30 МДж. Напряжение, прикладываемое к каждой из секций ускорителя возрастает от 5 кВ до 50 кВ. Ток в направляющих электродах находился в пределах от 650 кА до 700 кА. Расчетные характеристики многокаскадного ускорителя приведены в таблице 4.

Таблица 4

Расчетные характеристики многокаскадного рельсового ускорителя
Токийского технологического института

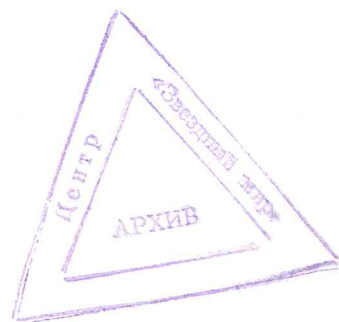
Характеристики	вариант1	вариант2	вариант3
количество секций	25	50	100
длина секции, м	23,4	16,1	7,13
общая длина ускорителя, м	685	807	713
тепловые потери, МДж	40	24	13
энергия, остающаяся в источниках питания МДж	4	6	13
скорость схода тела с направляющих, км/с	140	150-170	150-170

Как показали результаты проведенных в Японии исследований, при увеличении числа секций уменьшаются тепловые потери и, несмотря на увеличивающееся количество неиспользованной энергии общий КПД ускорителя возрастает приблизительно до 40 %.

Для питания созданных и разрабатываемых за рубежом экспериментальных образцов УР используются конденсаторные батареи, электромеханические генераторы, индукционные накопители энергии и источники питания с устройством для сжатия магнитного потока. УР как потребитель энергии характеризуется изменением в процессе ускорения тела индуктивности и активного сопротивления, большой величиной потребляемого тока (от десятков кА до единиц мА в зависимости от назначения и устройства) и относительно невысокой величиной напряжения. При применении дополнительного контура подмагничивания и катушек для усиления магнитного потока величину потребляемого тока уменьшают на 50-70 % с одновременным увеличением напряжения. За рубежом для обеспечения нормального функционирования УР применяют схемы формирования импульсов требуемой формы (с крутым передним и задним фронтами) и длительности (не больше времени нахождения тела в канале ствола при пуске).

При проектировании УР с распределенным вводом энергии к коммутационной аппаратуре предъявляются высокие требования по быстродействию и точности срабатывания.

Теоретические и экспериментальные исследования обнаружили ряд сложностей, возникающих при создании УР. В первую очередь, это большие потери, связанные с ростом сопротивления и индуктивности рельсов по мере увеличения их длины. Кроме того, для некоторых целей запуска, таких как, запуск космических аппаратов, рельсы вблизи казенной части, где осуществляется подвод тока, испытывают большую нагрузку при длительной подаче тока, превышение которой приводит к расплавлению и разрушению конструкции (рис.6).



Однако, по мнению зарубежных специалистов, с помощью УР можно "выстреливать" снаряды со скоростями порядка 100 км/с и поражают баллистические ракеты на любом участке траектории, электромагнитная пушка способна создавать более высокую плотность энергии по сравнению с другими перспективными видами оружия, в том числе мощными лазерами и ядерными боеприпасами (мощностью 25 кт).

Наиболее значительной областью применения УР может стать запуск грузов в космическое пространство. По мнению зарубежных специалистов в проблемах удаления с Земли радиоактивных отходов и строительства сооружений в космосе по экономическим и экологическим соображениям нет альтернативы использования электромагнитных пусковых установок. Для этой цели просматривается установка, способная запускать контейнер массой 1,5 т со скоростью 20 км/с. Размеры контейнера: диаметр 203 мм, длина 6,1 м. Пройдя за полсекунды плотные слои атмосферы толщиной 8 км, контейнер снизит скорость до 16 км/с. Эта скорость достаточна для выхода за пределы солнечной системы.

Для получения такой скорости при длине пусковой установки 20 км необходимо обеспечить ускорение 1000g. Если ускорение увеличить до 10000g, то длина пусковой установки составит 2 км. Такую установку можно соорудить на склоне горы или в вертикальной шахте. Достижение ускорения 10000g представляется вполне реальным.

Для отработки новых технических решений для разрабатываемых ударных систем наземного и космического базирования, основанных на использовании кинетической энергии, в лабораториях фирмы Максвелл в Сан-Диего (США) эксплуатируется электронно-магнитная пусковая установка "Chesmate" (compact high-energy capacitor module, advanced technology experiment). Работы финансируются ведомством перспективной науки и технологии совместно с организацией СОИ.

Установка "Chesmate" способна производить выстрелы довольно часто, что позволяет получить необходимую информацию для ее усовершенствования.

Известные установки подобного типа позволяют производить всего 1 выстрел в месяц, в то время как "Chesmate"-2 выстрела в день.

Каждый из 6 модулей конденсатора (рис.7,8) может накапливать энергию до 1МДж при максимальном напряжении заряда 44 кВ. Каждый модуль состоит из 20 submodule конденсаторов, каждый из которых способен накапливать энергию 50 кДж. К 1990г. предполагается использовать накопительные конденсаторы с энергией 1 МДж в одной банке.

Рельсовая пушка "Chesmate" предназначена для стрельбы пластиковыми снарядами кубической формы (5x5x5 см) массой 100г со скоростью вплоть до 4 км/с. Рельсы изготовлены из медного сплава, а изоляционный промежуток между ними из стекловолокна (эпоксидного изолятора).

Для начального разгона тела до 500 м/с используется гелиевый инжектор с целью уменьшения дуговой эрозии.

Скорость нарастания тока в рельсах превышает 200 кА/мс при разряде одной батареи конденсаторов и выстреле пушки.

"Chesmate" преобразует 20% накопленной эл. энергии в кинетическую энергию. На рис.9 показан момент после выстрела пушки и пламя-это плазма, образованная испарением фольгового проводника с тыльной части снаряда.

В соответствии с проектами СОИ предполагается уничтожение межконтинентальных баллистических ракет в течение 150-300 с после их взлета (стартовая фаза) и за время меньше 60 с в форсированном режиме.

Индукционные ускорители

Индукционные ускорители макротел являются линейными двигателями, использующими принцип действия электрических машин индукционного типа. Движение ускоряемых тел в этих устройствах осуществляется в зависимости от их конструктивного исполнения в направлении, совпадающем с осью катушек ускоряющей системы (продольное замыкание магнитного потока) или в направлении, перпендикулярном оси катушек (поперечное замыкание магнитного потока). За рубежом при создании индукционных ускорителей используют обе эти конструктивные схемы.

На тело (его короткозамкнутую обмотку) при протекании тока (I_k) в катушках ускоряющей системы действует сила, равная

$$F = \frac{M}{L_x} \frac{dM}{dx} I_k,$$

где L_x -индуктивность катушки; M -взаимная индуктивность

На рис. 10 показано изменение величины взаимной индуктивности в зависимости от положения тела относительно центра катушки в односекционном ускорителе. При движении тела происходит изменение направления действующей на него силы в момент прохождения им центра симметрии катушки. В связи с этим систему коммутации катушек строят таким образом, чтобы тело проходило одну из половин катушки при отключенном токе (используется только втягивающая или только толкающая сила) или, чтобы при прохождении телом центра симметрии катушки менялось направление тока в ней.

Индукционные ускорители по эффективности преобразования электромагнитной энергии в кинетическую (их КПД может быть свыше 50%) превосходят рельсовые ЭМП; для них характерно также отсутствие электрического контакта тела с ускоряющей системой. К недостаткам ускорителей этого типа относят сравнительно небольшую зону действия на тело электродинамической силы при применении одной катушки (секции). Это обуславливает необходимость применения многокаскадного ускорителя с системой коммутации катушек для придания телу высокой скорости - порядка несколько км/с.

Несмотря на сложность управления магнитным полем в многокаскадных индукционных ускорителях, за рубежом ведутся работы по их созданию с целью реализации преимуществ, свойственных этому типу ускорителей.

В Мюнхенском технологическом институте (ФРГ) разрабатывается однокаскадный индукционный ускоритель LWB для метания тел массой до 10 г со скоростью до 500 м/с. Данный ускоритель предназначен для использования в исследованиях воздействия метеоритных частиц на космический объект (вероятно с использованием теории подобия), а также для других целей, связанных с метанием различных тел, включая сыпучие и жидкие, которые будут ускоряться алюминиевым диском (предусмотрено возвращение его в исходное положение).

В качестве источника питания ускорителя LWB используется конденсаторная батарея. На рис. 11 показана зависимость скорости метания тел от напряжения на конденсаторе емкостью 42 мкф, которая разряжается на ускорительную катушку ($L_k=3\text{мкГн}$, $R_k=100\text{мОм}$). КПД ускорителя в проводимых экспериментах составлял около 10%.

При отклонениях напряжения на конденсаторной батарее на 0,5% от установленного значения скорость метания тел в экспериментах изменялась на 1%.

Напряжение 10-12 кВ является предельным для созданного экспериментального образца ускорителя LWB. При повышении напряжения выше этого значения для увеличения скорости тела происходило разрушение ускорительной катушки. В связи с этим ведется доработка ускорителя LWB с целью увеличения скорости и массы метаемых тел.

В США ведутся работы по созданию многокаскадных индукционных ускорителей. Фирма Electromagnetic Launch Research, Inc. совместно с Массачусетским технологическим институтом (г. Кембридж) разработала лабораторную установку-четырекаскадный индукционный ускоритель с продольным замыканием магнитного потока, с питанием от конденсатора. Характеристики этой установки :

Диаметр ствола	35мм
Масса тела	40-120г
Емкость конденсатора для питания одной секции	75 мкф
Максимальное напряжение	20кВ
Максимальный ток в ускоряющей катушке	60кА

При проведении демонстрационных испытаний совместной работы двух секций, получена скорость тела 325 м/с при КПД равном 15 %. Продолжается работа по оптимизации конструкции и подготовке к испытаниям всего ускорителя в комплексе, при этом предполагается значительно повысить КПД.

В США также разрабатывается индукционный ускоритель с поперечным замыканием магнитного потока. Каждая секция этого ускорителя содержит две соосно расположенные катушки, разделенные промежутком для прохода снаряда (рис. 12). Ускоряемое тело выполняется в форме низкого прямоугольного параллелепипеда.

Американскими специалистами выполнен расчет двух вариантов секции ускорителя этого типа (табл. 5), причем первый вариант оптимизирован по показателю эффективности (КПД). В качестве источника тока питания использована конденсаторная батарея энергоемкостью 830 кДж. Масса снаряда от 0,5 до 1,0 кг.

Таблица 5
Расчетные характеристики секции индукционного ускорителя

Характеристики	Вариант1	Вариант2
Размеры катушки:		
длина x ширина, мм	76x300	76x300
высота, мм	89	178
Энергия источника питания, кДж	460	645
Максимальный ток, МА	3,8	5,2
Максимальное ускорение		
м/с ²	12x10 ⁶	13x10 ⁶
КПД, %	45	33

Проведены демонстрационные испытания лабораторного образца, конструкция которого не позволяла использовать максимально расчетные токи, при этом достигнута скорость тела (до 0,5 кг) 290 м/с. Полученные данные используются для разработки многокаскадного ускорителя, который должен обеспечивать телам массой от 0,5 кг до 10 кг скорость до 2,0 км/с. В дальнейшем предусматривается разработать ускоритель с более высокими характеристиками (скорость около 15 км/с).

Питание рассмотренных выше индукционных ускорителей в проведенном эксперименте осуществлялось от конденсаторных батарей, в последующем возможно применение генераторов с сжимаемым магнитным потоком. Потребляемый ток в разрабатываемых ускорителях достигнет величины сотен кА-единиц МА при рабочем напряжении в десятки и сотни кВ. К коммутационной аппаратуре предъявляются весьма высокие требования по точности срабатывания и быстродействию, поскольку несвоевременная коммутация ускоряющих катушек может привести к появлению тормозящей силы.

Другое используемое за рубежом направление развития индукционных ускорителей базируется на применении конструктивно-схемного решения линейного асинхронного двигателя обращенного типа. В Центре электромеханики университета штата Техас (США) в рамках этого направления ведутся работы по созданию авиационной катапульты для разгона массивных тел (несколько тонн) до скорости несколько десятков сотен м/с и ускорителя для сообщения телу массой 1 кг скорость до 10 км/с (длина ускорителя -18 м).

В обоих проектах предусмотрено ускорение перемещения в пространстве магнитного поля за счет ступенчатого увеличения шага намотки ускоряющей катушки. Во втором проекте (18-метровый ускоритель), кроме того, предусмотрено увеличение частоты питающего напряжения. Разработка проекта такого электромеханического генератора для этих целей ведется в настоящее время.

Соленоидные ускорители

Соленоидные ускорители представляют собой линейные электродвигатели постоянного тока. Имеют высокий КПД преобразования электрической энергии в кинетическую, превышающий 50%, однако, возможности использования ускорителей этого типа для сообщения телу скорости более 1 км/с ограничены ввиду сильного нагрева токосъемных щеток и возможность дугообразования. В 70-х и начале 80-х годов разрабатывалось несколько проектов разгонных устройств с использованием соленоидных ускорителей. Одно из них предназначалось для запуска планеров массой 5 кг со скоростью 100 м/с. Для питания этого ускорителя использовалась конденсаторная батарея с энергоемкостью 240 кДж; при рабочем напряжении 350 В ток в катушке ускоряющей системы составлял несколько кА; при сообщении планеру ускорения 710 м/схс максимальный ток составлял 2 кА. Ввиду ограниченных возможностей соленоидные ускорители в пусковых электромагнитных установках широкого распространения не получили.

Таким образом, при создании за рубежом электродинамических ускорителей макротел основное внимание уделяется исследованиям и разработкам рельсовых электромагнитных пушек и индукционных ускорителей. Для дальнейшего повышения возможностей ЭДУ этих типов за рубежом ведутся исследования с целью решения ряда проблем, в числе которых ограничение эрозии токонесущих элементов и обеспечение точности и быстродействия срабатывания коммутационных элементов, используемых для управления полем в многокаскадных рельсовых и индукционных ускорителях.

Анализ ведущихся за рубежом программ по созданию ЭДУ показывает, что к 2000 г. образцы ускорителей могут быть переданы в эксплуатацию.

Разработки электродинамических ускорителей в США имеют конечной целью создание кинетического оружия для средств ПРО наземного и космического базирования, уничтожения летательных аппаратов, танков, морских целей, запуска самолетов, в том числе с авианосцев.

Накопленный опыт широких теоретических и экспериментальных исследований ЭДУ для военных целей следует использовать в мирных проектах освоения космического пространства, например: для вывода в космос элементов космических станций, удаления с земли радиоактивных отходов, замены первых ступеней ракет, загрязняющую среду.

Большую ценность представляют достигнутые результаты для реализации проектов ОТС и Микрогравитрон.

С этой точки зрения ниже, в качестве иллюстрации, рассмотрены два патента США (рис. 14 и 15), которые могут быть использованы при проектировании ОТС как альтернативные варианты.

В патенте G.A. Кемпу (рис. 14) предлагается многоступенчатый рельсовый ускоритель, состоящий из отдельных сегментов, питающихся через коммутационные элементы от источника постоянного тока.

Каждый из этих сегментов можно представить, в рамках ОТС, как длинный ускоритель со своим движущимся телом (грузом), который путем постепенного наращивания мощности питающего источника можно разогнать до требуемой скорости.

В патенте W.H. Kurherr (рис. 15) предлагается индукционный ускоритель для разгона больших объектов до второй космической скорости. Разгоняемые объекты имеют специальные отсеки для размещения грузов или пассажиров. Канал ускорителя диаметром до 3 м и длиной несколько километров вакуумирован. При движении объекта вдоль канала происходит переключение полярности внешних и внутренних катушек на объекте таким образом, что обеспечивается тяговое и левитирующее усилие. По мнению автора, предполагаемый ускоритель лишен недостатков, присущих рельсовому ускорителю.

По нашему мнению, указанным патентам, как и другим не попавшим в поле зрения, должна быть дана расчетная оценка применительно к ОТС и Микрогравитрону.

2. СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА.

Поскольку конечной целью в проблеме ОТС является разгон ротора до высоких скоростей, не ограниченный временем и длиной канала, представляется перспективным использование в ОТС трех принципиальных решений:

- линейных электрических двигателей (ЛД), управляемых путем изменения напряжения, частоты тока и полюсного деления;
- систем магнитного подвешивания (МП) ротора;
- вакуумированного канала для практического исключения аэродинамического сопротивления.

Здесь под ЛД подразумевается сегмент вращающейся электрической машины с ротором в виде кольца большого диаметра.

В связи с этим целесообразно рассмотреть состояние работ в области высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе, основные решения, достигнутые технические параметры и уровень разработки в ведущих странах (см. табл. 6-9, рис. 16-29).

ФРГ

Изучение системы электродинамического подвеса и линейных тяговых электродвигателей началось в 1970г. с опытов на небольшой лабораторной установке. В этом же году было принято решение о строительстве в Эрлангеме кругового полигона длиной 880 метров.

Западногерманские фирмы AEG, BBC и Siemens в результате испытаний на этом полигоне транспортного средства EET-01 массой 17 тонн скоростью до 140 км/ч при питании от преобразователя частоты мощностью 500 кВА установили, что использование "короткого" линейного асинхронного электродвигателя для транспортных систем с электродинамическим подвесом не является лучшим решением. Это, в основном, связано с тем, что преобразователь частоты приходится размещать на транспортном средстве, проигрывая по его полезной нагрузке, а также решать сложную задачу контактного токоподвода электроэнергии при высоких скоростях. В связи с этим указанные фирмы в 1979г. развернули работы по исследованию и разработке длинностаторных безжелезных (без магнитопровода) синхронных электродвигателей. В результате было создано транспортное средство EET-02 с длинностаторным двигателем и сверхпроводящими возбуждающими магнитами. Регулирование скорости EET-02, как и EET-01, осуществлялось путем изменения частоты переменного тока статического преобразователя частоты.

Благодаря выполнению обмотки индуктора на малую плотность тока до 0,5 А/мм электрические потери в ней находятся в допустимых пределах. Обмотка уложена в пазах бетонного обмоткодержателя, который не выполняет никаких электрических и магнитных функций и служит лишь для фиксации обмотки. Обмотка волнового типа выполнена одножильным кабелем, который имеет внутренний и внешний токопроводящие слои для выравнивания потенциала. Каждый слой состоит из отдельных изолированных проводников. Для монтажа длинного статора длиной 880 м на круговом полигоне потребовалось 30 км одножильного кабеля.

Основные технические данные экспериментального транспортного средства EET-02 сведены в таблицу

Основные технические данные
экспериментального транспортного средства

1. Транспортное средство	EET-02
Длина	-12,45м
Ширина	-3,8м
Масса	-14 тн
Максимальная скорость	-180км/ч
Ускорение при пуске	-1,4м/с ²
2. Безжелезный синхронный линейный электродвигатель	
Напряжение статора	-2,7кВ
Наибольшее усилие тяги	-20кН
Потребляемый ток	825А
Количество фаз	-3
Максимальная частота сети	-18 Гц
Полюсное деление статора	1,4 м
Ширина обмотки	1,2м
Количество пазов на полюс и фазу	-6
Количество параллельных ветвей обмотки	-2
Общая длина ветвей	2x440м
Сечение привода 1-й параллельной ветви	-240мм
"- " 2-й параллельной ветви	-240мм
Число возбуждающих катушек	-2
Наибольший МДС	-2x10
Воздушный зазор между обмоткой и катушкой магнитов	-250мм
Номинальная потребляемая мощность вспомогательного привода	-2x75кВт
Номинальное напряжение вспомогательного привода	-600В
Номинальное число оборотов вспомогательного привода	-1200 об/мин
Номинальное напряжение инвертора	-2,7кВ
Номинальный ток инвертора	-2x500 А
3. Магниты двойного возбуждения	
Средний диаметр катушки	1,22м
Среднее расстояние между соседними катушками	1,43 м
Поперечное сечение катушки	13,9x8,2см
Номинальный ток катушки	1000А
Полная индуктивность	4,36 Г
Эффективная плотность тока	92,5А/мм
Магнитная энергия	2,18 М Вт
Максимальная магнитная индукция	4,56 Т
Общая масса	3400 кг

В 1982г. было образовано новое общество Transrapid International (TRJ), в которое вошли фирмы MBB, Thyssen-Henschel, Krauss-Maffei и другие. TRJ занимается вопросами дальнейшего развития транспортных систем на магнитном подвесе и их внедрением в ФРГ и за ее пределами.

К 1990 г. предполагается реализовать полномасштабную систему типа Transrapid-06, причем наиболее реальным является трасса Франкфурт-на-Майне (ФРГ)-Париж (Франция).

При протяженности маршрута 500 км строительство такой системы является экономически целесообразным при интенсивности пассажиропотока свыше 800 тыс. чел. в год. В качестве другого варианта реализации рассматривается линия Лос-Анджелес-Лас-Вегас (США).

Система "Трансрапид-06" выполнена на базе электромагнитных систем подвеса и направления движения, ЛСД и бесконтактного линейного генератора для питания бортовых потребителей электроэнергии.

Транспортное средство "Трансрапид-06" характеризуется следующими техническими данными.

Длина состава	52,4 м
Ширина	3,7 м
Высота	
-полная	4,2
-над поверхностью полотна пути	3,7
-корпуса вагона	2,5
Масса	102,4 т
Скорость движения	
-длительная	300 км/ч
-наибольшая (кратковременная)	400 км/ч
Полезная нагрузка:	
-при скорости 300 км/ч	20 т
-при скорости 400 км/ч	6
Сопротивление движению, КН:	
-при скорости 300 км/ч	ок.30
-при скорости 400 км/ч	ок. 45
Мощность тягового электропривода	
-при скорости 300 км/ч	2,5
-при скорости 400 км/ч	ок.5
Нагрузка на путевую структуру	
-неподвижного транспортного средства	25 кНмм
-при скорости 400 км/ч на прямолинейном участке пути	45,3 кНмм

Секция транспортного средства опирается на четыре платформы. С каждой стороны платформы установлены по четыре подъемных (левитационных) и три или четыре направляющих электромагнита. Каждый электромагнит имеет свой импульсный регулятор тока, свою систему управления, включая датчики зазора.

Системы подвеса и направления движения сохраняют работоспособность без существенного ограничения эксплуатационных качеств при отказе одного магнита из каждых восьми. В системе подвеса используются электромагниты с продольным магнитным потоком, в системе направления движения - электромагниты с поперечным магнитным потоком.

Импульсный преобразователь питания обмоток электромагнитов обеспечивает регулирование напряжения на клеммах обмоток в пределах от

220 до 750 В. В целях ограничения потребляемой мощности подъем транспортного средства на магнитный подвес производится постепенно, начиная с носовой части головной секции

Параметры систем подвеса и направления движения.

Количество электромагнитов на секции состава	
- в системе подвеса	32
- в системе направления движения	28
Масса одного электромагнита, кг	
- системы подвеса	330
- системы направления движения	270
Зазор в системах подвеса и направления движения, мм	
- расчетный	10
- максимальный	8
Ток возбуждения электромагнита, А	
- номинальный	ок.30
- максимальный	80
Масса элементов подвеса (на одной секции), т	ок.32
Удельное подъемное усилие электромагнитов, кН/кВт	ок.10

Тяговый электродвигатель рассчитан на обеспечение длительного режима движения транспортного средства при его номинальной массе (122т) со скоростью 300 км/ч. Он также обеспечивает разгон облегченного до 100 т транспортного средства до скорости 400 км/ч и поддержание этой скорости на дистанции около 1000 м при отсутствии встречного или бокового ветра.

Принцип конструктивного исполнения тягового электродвигателя показан на рис. 19. Функции индуктора двигателя выполняют электромагниты системы подвеса транспортного средства.

Трехфазная обмотка статора электродвигателя расположена на пути. она разделена на 58 секций длиной от 300 до 3000 м. В каждой секции две части обмотки, находящиеся под одним и другим бортами транспортного средства. Обе части секции обмотки электрически соединены последовательно.

Обмотка уложена в пазы шихтованного сердечника. Пакет сердечника состоит из 360 склеенных между собой пластин трансформаторной стали. На первом участке пути длиной 20,5 км уложено 41000 пакетов сердечника. Обмотка статора выполнена одножильным кабелем.

ЛСА транспортного средства "Трансрапид-06" характеризуется следующими данными.

Общая характеристика	
Наибольшее тяговое усилие, кН	85
Наибольшее фазное напряжение, В	4250
Наибольший ток, А	1200
Наибольшая частота тока, Гц	215
Скорость, км/ч:	
- длительная	300
- наибольшая (кратковременно)	400
Мощность, развиваемая двигателем, кВт:	
- при скорости 300 км/ч	ок.2500
- при скорости 400 км/ч	ок.5000
Статор	

Пакет сердечника:	
-длина, мм	1031
-ширина, мм	185
-высота, мм	91,5
-количество пластин	360
-масса, кг	99
Пластина сердечника:	
-толщина, мм	0,5
-ширина зубца, мм	43
-средняя ширина паза, мм	43
-высота паза, мм	43
Полюсное деление, мм	258
Обмоточный кабель:	
-количество жил	1
-материал жилы	медь
-площадь поперечного сечения жилы, мм	150
-наружный диаметр, мм	31,5
-номинальное линейное напряжение, кВ	10
-максимальное линейное напряжение, кВ	12
-ток, допустимый в течение 30с, А	1500
Индуктор	
Размеры, мм	
-длина	1318
-ширина	232
-высота	190
Полюсное деление, мм	258

ЛСД работает при примерно постоянном магнитном потоке, определяемом необходимым левитационным усилием, значение которого меняется в ограниченных пределах. Поддержание необходимого значения магнитного потока производится регулятором тока возбуждения электромагнитов, который является элементом системы подвеса транспортного средства.

Таким образом, регулирование силы тяги ЛСД может осуществляться лишь по амплитуде и фазовому углу статора. Следует также отметить зависимость характеристик тягового электродвигателя от длины секции обмотки статора и ее расстояния от преобразовательной подстанции (длины магистрального кабеля).

Электроэнергия для питания обмотки статора тягового электродвигателя поступает из энергосистемы напряжением 110 кВ и частотой 50 Гц. На преобразовательной подстанции оно подвергается двукратному трансформированию, 12-пульсному выпрямлению и последующему инвертированию в трехфазное, регулируемое по напряжению и частоте.

На промежуточную сеть постоянного тока работают два полностью управляемых тиристорных выпрямителя. Каждый из них рассчитан на полную нагрузку, создаваемую тяговым электродвигателем транспортного средства. Напряжение в промежуточной цепи постоянного тока поддерживается на заданном уровне 2600 В независимо от колебаний напряжения в питающей сети и величины нагрузки, создаваемой двигателем.

В схеме преобразовательной подстанции предусмотрены две инверторные группы. В каждую инверторную группу преобразовательной подстанции входят восемь инверторов и четыре трансформатора. Два инвертора и один

трансформатор образуют блок.

Выходное напряжение блока регулируется* сдвигом фаз выходного напряжения генераторов.

Параметры основных элементов преобразователя

Промежуточный трансформатор	
-первичное напряжение, кВ	110
-вторичное напряжение, кВ	20
-мощность, МВхА	31,5
Выпрямительный трансформатор:	
-первичное напряжение, кВ	20
-вторичное напряжение, В	2x1120
-мощность, МВхА	
-количество трансформаторов	2
Выпрямитель	
-количество выпрямителей	2
-напряжение на выходе, В	1300
-ток, А	3314
Напряжение промежуточной цепи постоянного тока, В	2600
Инвертор:	
-количество инверторов	16
-диапазон регулируемой частоты, Гц	0-215
-номинальный ток, А	680
Выходной трансформатор:	
-количество трансформаторов	8
-коэффициент трансформации	2:1
-длительная мощность, МВхА	1,8

Каждая инверторная группа преобразователя питает свой магистральный кабель. Сменные секции обмотки линейного электродвигателя подключаются к разным кабелям. Благодаря этому исключаются перерывы питания секции обмотки статора линейного двигателя в период переключения и обеспечивается возможность включения и отключения секции при нулевом значении тока. Включение секций обмотки статора электродвигателя производится в соответствии с программой движения транспортного средства. В качестве коммутационных аппаратов используются вакуумные контакторы, установленные в специальных переключательных подстанциях. Тридцать таких подстанций расположены вдоль пути.

Подвод энергии от преобразовательной подстанции к переключательным осуществляется гибкими трехфазными кабелями с алюминиевыми жилами.

Параметры кабелей следующие:

Номинальное напряжение, кВ:

-фазное	6
-линейное	10
Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ	12
Площадь поперечного сечения жилы, мм ²	150

Экран кабеля:

-тип	повив из медных проволок
-площадь поперечного сечения, мм ²	16
Наибольшая температура жилы, град.	90

Омическое сопротивление жилы при
90 , мОм/км

-при частоте тока 50 Гц 266
-при частоте тока 215 Гц 282

Индуктивность жилы, мкГн/км 285

Емкость кабеля, мкФ/км 365

В районе прямолинейной части пути каждая магистраль выполнена четырьмя кабелями. Это сделано с целью уменьшения падения напряжения на кабеле, чтобы добиться максимального тягового усилия линейного двигателя, необходимого для разгона транспортного средства до предельной скорости. На остальных участках в каждой магистрали по одному кабелю.

Очередная секция обмотки статора подключается к магистральному кабелю с таким расчетом, чтобы ток в ней достиг необходимого значения незадолго до входа на нее транспортного средства. Заданное значение тока в секции поддерживается в течение всего времени нахождения на ней транспортного средства. Управление переключением секций осуществляется на основе подсчета периода тока обмотки статора. За один период тока транспортное средство проходит отрезок пути, равный двойному полюсному делению составляющему 0,516 м.

Включение и отключение секций производится контакторами. Контактторы, соединяющие фазы секции обмотки в звезду, остаются замкнутыми в течение всего времени работы транспортной системы. Они размыкаются лишь в период подготовки транспортной системы к работе, когда производится проверка состояния обмотки статора линейного двигателя и, в частности, отсутствие замыканий обмотки на землю.

Помимо вакуумных контакторов на переключательных подстанциях установлены:

- быстродействующие предохранители в каждой фазе секции обмотки статора. Предохранители отключают ударный ток короткого замыкания в течение нескольких миллисекунд;
- датчики замыкания секции обмотки на землю, вызывающие немедленное отключение запитывающих и соединительных контакторов;
- грозовой разрядник для защиты переключательной подстанции в случае удара молнии в путь;
- заземляющие выключатели, используемые в целях безопасности при проведении на пути ремонтных и прочих работ.

Электроэнергия, необходимая для управления контакторами, электрического обогрева подстанции и работы приборов дистанционного управления подается на подстанцию от ряда расположенных вдоль пути трансформаторов 20/0,6 кВ. Переключательные подстанции установлены под эстакадой вблизи тех опор, где сходятся смежные секции обмотки статора линейного электродвигателя.

Управление работой путевого оборудования и контроль за его функционированием осуществляет счетно-решающее устройство, установленное в центре управления транспортной системой. Помимо переключения секций обмотки статора линейного электродвигателя оно выполняет еще целый ряд функций:

- осуществляет контроль исправности оборудования пути перед вводом транспортной системы в работу;
- контролирует правильность отдачи и исполнение команд на включение-отключение секций обмотки статора линейного электродвигателя;
- исключает питание двух секций обмотки от одной инверторной группы;
- регистрирует случаи короткого замыкания секций обмотки статора, замыкания на землю и другие неисправности на отдельных участках пути;

8

-вырабатывает и подает в систему управления движением транспортного средства необходимые сигналы.

Потребляемая электрооборудованием транспортного средства мощность может достигать 450 кВт.

Основным источником электроэнергии на транспортном средстве является линейный генератор индукционного типа. Обмотка линейного генератора уложена в пазы, выштампованные в полюсных наконечниках полюсов электромагнитов системы подвеса и тяги. Изменение магнитного потока, сцепленного с секциями обмотки линейного генератора при их прохождении последовательно под полюсами и под зубцами сердечника статора, вызывает появление в них э.д.с. Секции обмотки линейного генератора замкнуты на выпрямители. выпрямленные напряжения складываются. Суммарное напряжение стабилизируется на уровне 440 В и подается в бортовую сеть.

При скорости транспортного средства 75 км/ч линейный генератор каждой секции вырабатывает около 95 кВт мощности, которой уже достаточно для питания электромагнитов системы подвеса и направления движения. При скорости выше 125 км/ч избыток мощности, вырабатываемой линейным генератором, используется для подзаряда кадмий-никелевой аккумуляторной батареи. Аккумуляторная батарея каждой секции транспортного средства состоит из 348 элементов и имеет емкость 40 или 80 Ач (по разным данным). Она работает в буферном режиме с сетью. Назначение аккумуляторной батареи-покрывать дефицит электроэнергии на малых скоростях движения транспортного средства, когда мощности, вырабатываемой линейными генераторами, оказывается недостаточно для нормальной работы потребителей.

На стоянке транспортное средство подключается к сети постоянного тока напряжением 750 В, от которой через импульсный преобразователь осуществляется питание бортовых сетей и подзаряд аккумуляторной батареи. В 1983 году фирма Magnetbahn (ФРГ) начала работы над проектом магнитной дороги М-Вahn с системой подвеса на постоянных магнитах. Фирма ВМЕТ (75%) и местные власти Западного Берлина (25%) субсидировали на строительство системы 30 млн.марок ФРГ. Постоянные магниты подвеса устанавливаются на продольных балках тележек на расстоянии 12 см между полюсами.

Относительное подъемное усилие магнитов при воздушном зазоре от 14 до 24 мм составляет от 8000 до 4000 Н/м. Регулирование воздушного зазора между магнитами и расположенными над ними несущими рельсами осуществляется с помощью рычажной передачи в зависимости от нагрузок вагона и действующих на него динамических сил. Для создания тяговых и тормозных усилий применен синхронный линейный двигатель с длинным активным статором, питающимся от статических преобразователей с ШИМ. Трехфазная обмотка двигателя, расположенная на пути, выполнена алюминиевым кабелем с площадью поперечного сечения жилы 140 мм².

Обмотка разделена на секции длиной от 100 до 300 м. Роль индуктора линейного двигателя выполняют постоянные магниты систем подвеса. Таким образом, движение транспортного средства осуществляется без подвода электроэнергии на борт.

Коэффициент полезного действия линейного двигателя зависит от длины секции обмотки, режима движения транспортного средства и изменяется в пределах от 70 до 90 %.

Подвес данного типа с соответствующей системой направления рассчитан на применение при скоростях движения до 100 км/ч.

Япония

В Японии разрабатываются два основных проекта транспортной системы на магнитном подвесе: авиационной компании (JAL) и национальных железных дорог (JNR).

Компания JNR занималась созданием транспортных систем с электродинамической левитацией. В 1970г. создан первый испытательный участок для исследований магнитной левитации со сверхпроводящими катушками. В 1972г. были изготовлены два испытательных вагона: LSM 200, оборудованный синхронным линейным двигателем с длинным статором и ML 100, оснащенный асинхронным линейным двигателем с коротким статором.

В 1977г. началось выполнение широкой научно-исследовательской программы на семикилометровом испытательном участке в Миядзаки, на котором в 1979г. вагон ML 500 достиг рекордной скорости 517 км/ч. После испытания экипажей ML500 и ML500R на полигоне в Миядзаки начался новый этап экспериментальных работ с измененным U-образным сечением пути.

На путевой структуре U-образного сечения установлены катушки подъема и направления, а на вагонах-сверхпроводящие магниты. Катушки подъема и направления каждой стенки путевой структуры сгруппированы по три соединенных последовательно, при этом каждая группа подключена к одной питающей секции.

Катушки сверхпроводящих магнитов, имеющие магнитодвижущую силу по 700 кА, распределены по длине вагона. На каждом вагоне их восемь-два ряда по четыре катушки в каждом. Обмотка путевых катушек изготовлена из алюминия, а обмотка катушки сверхпроводящих магнитов-сплава ниобия и титана. Масса одного сверхпроводящего магнита 650 кг. На каждом вагоне установлены устройства для сжижения испарившегося гелия. Магниты закреплены на рамах тележек, на которые кузов вагона опирается через пневмокомпрессоры. Обмотки путевой структуры питаются от двух преобразователей мощностью по 9,64 мВА, установленных на подстанции, где также находится синхронный мотор-генератор, подающий трехфазное напряжение 11 кВ, 120 Гц преобразователям. Два четырехпроводных комплекта фидеров обеспечивают электроснабжение обмоток путевой структуры от преобразователя. Одновременно питание получают обмотки, расположенные на участке длиной 42 м. Этого достаточно, поскольку длина поезда 28,8 м. Для движения поезда регулируются напряжение и частота в обмотках. Трехвагонный поезд достиг максимальной скорости 222 км/ч, двухвагонный-305 км/ч, один вагон-400 км/ч. Для дальнейшего увеличения скорости необходимо повысить мощностью системы электроснабжения.

США

США являются одной из первых стран, начавших исследовательские работы по проблемам транспорта на магнитном подвесе. Технология Maglev в США развивалась как часть Программы высокоскоростного наземного транспорта, утвержденной правительством в 1965г. Первоначально изучались все возможные концепции наземного транспорта. Большое внимание было уделено разработке линейных двигателей, особенно синхронных односторонних. США стали ведущей страной в мире в области линейных двигателей. В стране разработано несколько систем на магнитном подвесе и получены важные технико-экономические результаты. Среди крупных проектов следует отметить программы LIMRV фирмы Gurrett и SLEM фирмы General Electric. Испытания экипажа LIMRV с колесными опорами и линейным асинхронным двигателем выполнялись на десятикилометровом полигоне в

10
Пуэбло и позволили достигнуть скорости 410 км/ч.

К 1975г. в США утвердилось мнение, что технология Maglev не решит проблемы железнодорожного транспорта, поэтому Программы развития магнитного транспорта были аннулированы.

Вскоре, успешно проводившиеся в Японии и ФРГ работы в области транспорта на магнитном подвесе, возродили интерес к нему в США. Был подписан договор с группой фирм ФРГ Thyssen-Henschel, Krauss-Maffei и MBW на исследовательские работы и предварительное проектирование системы транспортирования на магнитном подвесе для перевозки пассажиров по маршруту Лос-Анджелес-Лас-Вегас (США).

Система с электромагнитным подвесом и линейным синхронным двигателем, испытанная в ФРГ на Эмсландском полигоне, положена в основу проекта скоростной системы транспортирования протяженностью 370 км, разработанного компанией Budd (США). Пассажирские перевозки будут организованы транспортными средствами с максимальной скоростью 400 км/ч. В качестве путевой структуры предполагается использовать эстакаду на бетонном основании, уложенном на балласт. Статорная обмотка линейного синхронного двигателя расположена на пути и питается от тяговых подстанций. Трасса спроектирована с кривыми радиусами не менее 1500 м. Введение системы в эксплуатацию намечено на 1990 год. В 3,1 млрд.долл. оценивается создание 230 км дороги между Лос-Анджелесом и Сан-Диего с ответвлением к международному аэропорту г. Лос-Анджелес.

Таблица 6

Технические характеристики экипажей с электромагнитной системой левитации (ФРГ)

	Prinzip fahrzeug	Komet	*TR 01	TR 02	TR 04	TR 05	TR 06
I	2	3	4	5	6	7	8
Изготовитель вагона	MBB	MBB	Krauss-Maffei	Krauss-Maffei	Krauss-Maffei	Transrapid EMS	Transrapid EMS
Изготовитель привода	MBB	MBB, Flugzeugwerke Emmer	MBB, Flugzeugwerke Emmer	AEG-Telefunken, Merlin & Gopin	AEG-Telefunken	Thyssen Industrie A	AEG-Telefunken, Brown, Boelke & Cie
Год создания	1971	1974	1970	1971	1973	1979	1980
Ввод в эксплуатацию	1971	1975	1970	1971	1973	1979	1980
Вагон:							
длина, м	7,6	8,5	0,6	11,7	15,0	26,2	54,0
ширина, м	2,1	2,5	0,2	2,9	3,4	3,1	3,0
высота, м	1,8	1,5	-	2,4	2,8	3,4	4,0
пустой вес, т	5,2	8,8	-	10,7	18,5	30,8	102,0
полезный вес, т	0,6	0,2	-	0,6	1,5	5,2	20,0
максимальный общий вес, т	5,8	9,0	0,05	11,3	20,0	36,0	122,0
Система левитации	электромагнитная	электромагнитная	электромагнитная	электромагнитная	электромагнитная	электромагнитная	электромагнитная
	10	11					10

I	2	3	4	5	6	7	8
Привод:	асинхрон- ный линей- ный двига- тель с коротким статором	6 паровых ракет	асинхрон- ный линей- ный двига- тель с коротким статором	асинхрон- ный линей- ный двига- тель с коротким статором	асинхрон- ный линей- ный двига- тель с коротким статором	синхрон- ный линей- ный двигатель с длинным статором	синхрон- ный линей- ный двигатель с длинным статором
мощность привода, кВт	200	-	-	-	-	570	-
максимальная сила тяги, кН	10	500	-	31	36,3	28	85
Номинальная скорость, км/ч	85	400	-	150	250	75	400
Реальная максимальная скорость, км/ч	90	401,3	-	164	253,2	-	-
Путевая структура:							
длина, м	660	1300	3,3	930	2400	908	31500
материал, из которого изгото- влена путевая структура	сталь на деревян- ных шпалах	сталь	сталь	бетон	бетон и сталь	сталь	бетон и сталь
высота опоры, м	0	1,0	1,0	0	4,5	5,5	5
Наименьший радиус поворота, м	∞	∞	∞	300	800	1800	1000

*TR - Transrapid

Технические характеристики системы M-Bahn (ФРГ)

Изготовитель вагона	Magnetbahn
Изготовитель привода	АEG - Telefunken
Год создания	1980
Вывод в эксплуатацию	1980
Вагон:	
длина, м	12
ширина, м	2,3
высота, м	2,3
порожний вес, т	8,0
полезный вес, т	7,2
максимальный общий вес, т	15,2
Система левитации	постоянные магниты
Система направления	ролики
Привод:	линейный синхронный
	двигатель с длинным статором
максимальная сила тяги, кН	22
номинальная скорость, км/ч	80
максимальная достигнутая скорость, км/ч	47
Путевая структура:	
длина, м	16000
материал из которого изготовлена строительная часть путевой струк- туры	бетон и сталь
наименьший радиус поворота, м	35

Технические характеристики систем с электромагнитной системой левитации (Япония)

	HSST 01	HSST 02	HSST 03
I	2	3	4
Изготовитель вагона	Japan Air Lines.	Japan Air Lines.	Tokyo Car Co. Ltd.
Изготовитель привода	Japan Air Lines	Japan Air Lines	Sumitomo Denki
Год создания	1975	1977	1983
Ввод в эксплуатацию	1975	1978	1984
Вагон:			
длина, м	4,2	6,8	13,8
ширина, м	2,6	2,0	2,9
высота, м	1,1	1,75	3,0
порожний вес, т	1,0	1,8	12,0
полезный вес, т	-	0,46	3,0
максимальный общий вес, т	1,0	2,26	15,0
Количество пассажирских мест	-	7	45
Система левитации	электромагнитная	электромагнитная	электромагнитная
Воздушный зазор, мм	10	10	10

1	2	3	4
Привод:	Асинхронный линейный двигатель с коротким статором	Асинхронный линейный двигатель с коротким статором	Асинхронный линейный двигатель с коротким статором
мощность привода, кВт	200	200	400
максимальная сила тяги, кН	3,4	3	11,4
номинальная скорость, км/ч	300	100	30
Реальная максимальная скорость, км/ч	307,8		
Путевая структура : длина, м	200/1600	1300	367
материал из которого изготовлена путевая структура	бетон и сталь	бетон и сталь	бетон и сталь
высота опоры, м	0,7	0,7	1,2
наименьший радиус пово- рота, м	280	280	беск.

Технические характеристики систем с электродинамической левитацией (Япония)

I	ML 100/100A	ML 500	ML 500R	MLU 001
	2	3	4	5
Изготовитель вагона и поездов	Hitachi Toshiba Mitsubishi	Hitachi Toshiba Mitsubishi	Hitachi Toshiba Mitsubishi	Hitachi Toshiba Mitsubishi
Год создания	1972	1976	1979	1980-1982
Ввод в эксплуатацию	1972/1975	1976	-	MLU-001-1 - ICE MLU-001-3 - ICE MLU-001-2 - ICE
Вагон:				
длина, м	7,0	13,5	12,6	28,8
ширина, м	2,5	3,7	3,7	3,0
высота, м	2,2	2,7	3,8	3,3
порожний вес, т	3,5	10,0	12,7	30,0
полезный вес, т	-	-	-	2,4
максимальный общий вес, т	-	10,0	12,7	32,4
количество пассажирских мест	4	-	-	32
Система левитации	электродинамическая		электродинамическая	
воздушный зазор, мм	100	100	100	100

1	2	3	4	5
Привод:	Асинхронный линейный двигатель с коротким статором/синхронный линейный двигатель с длинным статором	Синхронный линейный двигатель с длинным статором	синхронный линейный двигатель с длинным статором	синхронный линейный двигатель с длинным статором
Мощность привода, кВт	550	9600	9600	9600
Максимальная сила тяги, кН	20	43	43	153
Номинальная скорость, км/ч	60	500	200	220
Реальная максимальная скорость, км/ч	60	512	201	400
Путевая структура: длина, м	480	7000	4700	7000
материал, из которого изготовлена строительная часть путевой структуры	бетон	бетон	бетон	бетон
высота опоры, м	0	8-11	8-11	8-11
наименьший радиус поворота, м	беск.	10000	беск.	10000

3. Выбор варианта и расчет двигателя ОТС

3.1 Вводные замечания и некоторые примеры

Известный специалист по линейным электродвигателям директор фирмы "Linear Motors Ltd." (Великобритания) Лэйтвейт считает, что отход от привычной цилиндрической формы вращающихся электрических машин открывает богатый мир трехмерных конструкций.

Лэйтвейт указывает, что линейные двигатели с движущейся первичной частью могут быть названы "Вращающимися машинами с планетой Земля в качестве ротора".

Условием работоспособности такой конструкции, например, по принципу асинхронной машины, является наличие слоя электропроводящего материала, которым нужно покрыть нашу планету.

Независимо от этого суждения, после ознакомления с идеей ОТС, у нас в воображении возникла гигантская электрическая машина, статор и ротор которой, разделенные зазором, опоясывают экватор.

Эту машину скорее нужно отнести к классу цилиндрических вращающихся, напоминающую отдаленно по своим размерным соотношениям сверхмощный тихоходный гидрогенератор. При таком подходе в принципе нет запрета на использование известных и широко апробированных методов расчета вращающихся машин (синхронных, асинхронных, постоянного тока). С методологической точки зрения и для привлечения внимания к идее ОТС это весьма ценно, так как инженеров занимающихся вращающимися электрическими машинами намного больше, чем специалистов по линейным двигателям. С другой стороны, электромашиностроение, имея многолетнюю историю, большие достижения и промышленный потенциал, может явиться основной базой для создания двигателя ОТС, включая выбор проводниковых, магнитных и конструкционных материалов, технологических приемов, конструктивных решений и др.

До появления электромагнитной катапульты фирмы "Вестингауз" большинство инженеров-электромехаников было настолько убеждено в эффективности вращательного движения и высоком К.П.Д. цилиндрических электрических машин, что, по существу, не занималось линейными электродвигателями, хотя они были изобретены Уитстоном еще в 1841 году.

На рис. 30 показано поперечное сечение линейного асинхронного двигателя упомянутой катапульты. Двигатель содержит одностороннюю первичную часть (трехфазный индуктор), смонтированную на тележке, которая опирается на систему колесо-рельс. На тележке имеется трехфазное контактное устройство (одна фаза заземлена). Неподвижная вторичная часть имеет длину 421 м и состоит из обмотки типа беличьей клетки, изготовленной из медного сплава и вставленной в шихтованный стальной сердечник. По сопротивлению обмотка разделена на четыре секции, причем большие сопротивления имеют участки, расположенные по концам пути, а меньшие-участки в центре.

Двигатель, создавал силу тяги около 8 тонн при любой скорости от 0 до 354 км/ч и мощности до 8000 кВт.

Электропитание его осуществлялось от генератора с маховиком, номинальная мощность которого в течение 15 сек достигала 12000 кВт при частоте 220 Гц. Поскольку двигатель использовался только для ускорения и его режим был кратковременным, к.п.д. и коэффициент мощности имели второстепенное значение и их влияние было учтено введением большого запаса по тяговому усилию.

В начале 50-х годов в Англии был создан двигатель, до сих пор непревзойденный среди линейных двигателей всех типов. Он развивал скорость около 0,5 км/с при потребляемой мощности 25 мВА в индукторе и 4 мВА в якоре. Питание подвижного якоря массой около 500 г осуществлялось с помощью щеток и рельсов длиной 14 м при начальном напряжении 52 В и токе 81 кА. Источником питания служила батарея из 1200 свинцово-кислотных аккумуляторов с выходным напряжением 96 В и током 260 кА.

Работы самого последнего времени, посвященные аналогичной системе, направлены на использование сверхпроводниковых возбуждающих электромагнитов, размещенных на подвижной части и создающих одновременно постоянный ток в путевых шинах и якорном элементе. Такое решение позволяет приводить в движение экипаж массой 50 т при токе не более 300 А в петлевой обмотке, уложенной в путевой структуре. Работы над такой системой проводятся в Торонтском университете (Канада). Эксперименты показали, что секции пути с петлевой обмоткой могут достигать длины 10 км при общем к.п.д. до 70 %. Подвеска и стабилизация экипажа могут осуществляться с помощью отдельных сверхпроводниковых электромагнитов, установленных по обе стороны от электромагнитов двигателя.

Приведенные в этом разделе примеры разработанных линейных двигателей для средств разгона, а также в разделе для транспортных средств типа "ЕЕТ" и "Transrapid", выбраны из многочисленных зарубежных публикаций как наиболее близкие к рассматриваемой нами проблеме создания двигателя ОТС.

За последние 25 лет ВИНТИ АН СССР выявило более 3000 отечественных и зарубежных публикаций, освещающих вопросы линейного электропривода. Распределение опубликованной информации по типам линейного электропривода установлено следующее: 70%-асинхронный, 4%- синхронный, 5%-постоянного тока, 21%- МГД, шаговый и др.

Объем информации по линейному электроприводу в целом за последние десятилетия удваивался в среднем каждые пять лет, что более чем в два раза превышает темпы развития всей науки. Это означает, что линейный электропривод относится к развивающимся перспективным направлениям техники.

Анализ свидетельствует о преимущественной разработке в настоящее время линейных приводов с асинхронными двигателями, поэтому в ближайшем будущем можно ожидать распространения именно таких приводов.

Многие разработчики в силу простоты технических решений и меньших материальных затрат отдают предпочтение линейному асинхронному двигателю с односторонним индуктором.

3.2 Технический уровень линейных двигателей и предложения по его повышению

В СССР научно-исследовательские работы по проблеме ВСНТ и по линейному электроприводу в частности, были широко развернуты в начале семидесятых годов. За прошедший период в рамках Всесоюзных научно-технических программ выполнен значительный объем расчетно-экспериментальных исследований многочисленными организациями страны. Проведено несколько Всесоюзных научно-технических конференций, много семинаров, опубликованы сборники докладов [132, 136]. Созданы экспериментальные установки и полигоны, наиболее крупные из которых находятся в ОКБ линейных электродвигателей (г. Киев), Гидротрубопровод (г.Раменское), ВЭЛНИИ (г.Новочеркасск). В ОКБ ЛЭД освоено производство более десятка конструкций линейных двигателей, в большинстве своем асинхронного типа

Табл. 18

Линейные асинхронные двигатели для разгонных устройств

Условное обозначение двигателя	Напряжение, В	Частота (макс.), Гц	Скор. (макс.) м/с	Пусковое тяговое усилие, Н	Макс. тяговое усилие, Н	Пусковой ток, А	Пусковой	Масса индуктора, кг	Механ. зазор, мм	Габаритные размеры индуктора, мм
ЛАД-01Р	545	100	30	9000	10750	1398	0,55	250	6	1235X430X210
ЛАД-02Р	720	120	30	13600	13660	1574	0,52	220	5	1014X340X192
ЛАД-03Р	1500	100	23	37700	40500	1134	0,44	360	6	1247X368X270

Примечание:

1. Конструктивное исполнение двигателей - двухстороннее расположение индукторов с немагнитным вторичным элементом
 2. Число фаз - 3
 3. Охлаждение - естественное
 4. Режим работы - кратковременный
 5. Исполнение климатическое - У2, У3
 6. Регулирование скорости - частотное, точность поддержания скорости 1%-4%
- Область применения - экспериментально-исследовательские установки (опытовые бассейны, ката-

Линейные асинхронные электродвигатели для новых видов пассажирского транспорта

Условное обозначение двигателя	Напряжение, В	Частота, Гц	Ток, А	Скорость, м/с	Сила тяги, Н	КПД, %	$\cos \varphi$	Немагнитный зазор, мм	Масса двигателя, кг	Габаритные размеры двигателя, мм
ЛАД-СПТС*(**)	380	50	850	21	6000	63	0,356	26	780	1310x466x435
ОЛАД-120	660	50	360	25	4800	60	0,49	12	550	1900x550x160
ОЛАД-360	1140	50	532	25	14400	73	0,47	12	1500	3760x660x160
ЛАД-420*(**)	1500	80	413	34	12360	77	0,51	26	2000	3911x999x628
ЛАД-600*(**)	1500	100	513	44	13500	79	0,57	30	2000	3250x760x1028
ОЛАД-800	3000	150	796	III	7200	73	0,265	30	1475	3911x1000x204
ЛАД-1200*(**)	2000	200	665	56	21600	84	0,62	30	3150	3750x1484x740

Примечание:

1. Конструктивное исполнение двигателей - Одностороннее расположение индуктора с комбинированным вторичным элементом (* - двухстороннее расположение индуктора с немагнитным вторичным элементом)

2. Исполнение климатическое - У2

3. Охлаждение - естественное (***) - воздушное принудительное)

Область применения - тяговый линейный электропривод новых видов пассажирского транспорта, колесного (рельсового, на пневмоходу) и бесколесного (на магнитной подвеске, на воздушной подушке)

Таблица 20

Тяговые линейные асинхронные двигатели для рельсового промышленного транспорта

Условное обозначение двигателя	Напряжение, В	Частота, Гц	КПД, %	$\cos \varphi$	Скорость, м/с	Тяговое усилие, Н	ПВ, %	Механ. зазор, мм	Масса индуктора, кг	Габаритные размеры двигателя, мм
ЛА1-Б-30/0,56 -7,0	660	50	43,7	0,353	7,0	16600	5	II	624	1300X1100X1
ЛАД-120*	380	50	65	0,53	9,6	9600	10	8	500	1700X600X51
ЛА2Н-18/5- -0,45*	660	25	55	0,457	4,8	16600	15	10	1590	1700X750X82
ЛА0-2600/65	380	50	60	0,415	6,5	20400	25	6	1500	2840X1000X1

Примечание:

1. Конструктивное исполнение двигателей - одностороннее расположение индуктора с комбинированным вторичным элементом (* - двухстороннее расположение индуктора с немагнитным вторичным элементом)

2. Число фаз - 3

3. Исполнение климатическое - У2

4. Охлаждение - естественное

Область применения - линейный электропривод систем промышленного транспорта с расположением индукторов в пути (конвейерные поезда, слитковозы и слябовозы, рельсовые тележки)

(см. табл. 18-20). Они предназначены для новых видов пассажирского и промышленного транспорта и разгонных устройств.

Однако, как отмечалось на последних конференциях и совещаниях, общее состояние проблемы ВСНТ в нашей стране нельзя считать удовлетворительным прежде всего из-за отсутствия заказчика и не участия в работах ведущих электротехнических организаций страны, разрабатывающих электрические машины, электропривод, преобразовательную технику.

Отсутствие заказчика системы ВСНТ обуславливает несовершенство организационных форм выполнения и координации работ, отсутствие единой технической политики.

Особо неудовлетворительное состояние выявилось по работам, связанным с электродинамическим подвесом и линейными синхронными двигателями.

Указанные факторы, в основном, и обусловили значительное отставание этого нового вида техники от зарубежного уровня.

На наш взгляд, разработка ОТС может дать новый импульс разработкам ВСНТ и, прежде всего, линейного электропривода и преобразовательной техники.

К настоящему времени, несмотря на значительный объем выполненных исследований как в СССР, так и за рубежом по созданию новых транспортных систем с линейными тяговыми электродвигателями, отсутствуют технические решения, полностью удовлетворяющие практику по технико-экономическим характеристикам.

Например, по результатам испытаний экипажей с линейным асинхронным приводом в США, ФРГ, Японии и Великобритании в качестве предельных показателей привода принято считать достижимыми удельную тягу на уровне $1,0 \times 10^4 \text{ Н/м}^2$, а энергетический фактор, определяемый произведением к.п.д. на коэффициент мощности, на уровне 0,25-0,4. Основной причиной столь низких технико-энергетических показателей следует считать повышенный воздушный зазор между индуктором и вторичной частью линейного асинхронного двигателя (ЛАД), а также применение массивной (комбинированной) вторичной части, возможности которой ограничены в силу размагничивающего действия вторичного тока.

Поэтому идет поиск приоритетных технических решений.

В наиболее интересной публикации последних лет по теории линейных асинхронных электродвигателей-монографии японского профессора Ямамуры [указывается на перспективность разработки ЛАД со вторичной фазной обмоткой (ФРШ) для новых транспортных систем с индукторами в пути. Он пишет: "Неожиданным и странным представляется тот факт, что вторичный элемент, выполненный в виде обмотки, никогда не применялся в ЛАД." "Наибольшим преимуществом ЛАД с вторичным элементом обмоточного типа является полное подавление концевоего эффекта". "Другое положительное свойство заключается в бесконтактном электропитании ЛАД. Расположение же обмотки вторичного элемента на транспортном средстве позволяет управлять процессами пуска и осуществлять регулирование скорости движения с помощью добавочных сопротивлений в цепи вторичного элемента. Это одна из самых дешевых систем пуска и регулирования скорости, позволяющая отказаться от применения более дорогих источников питания с регулируемой частотой".

Далее проф. Ямамура призывает к широкому и детальному теоретическому и экспериментальному анализу предлагаемого типа ЛАД, учитывая ряд перечисленных его достоинств.

Нужно отметить, что в нашей стране идея использования ЛАД со вторичной фазной обмоткой выдвигалась на несколько лет раньше, однако она не получила, к сожалению, должного развития вплоть до появления

новых компенсирующих устройств (КУ), построенных на базе конденсаторов с двойным электрическим слоем.

В 1974г. по инициативе члена-корреспондента АН СССР Лидоренко Н.С. начаты расчетно-экспериментальные исследования новых КУ во вторичных цепях цилиндрических и линейных асинхронных машин. В результате был предложен целый ряд технических решений на уровне изобретений, одно из которых запатентовано в Великобритании и Франции и патентуется в Японии [28-38, 136, 137].

Широко известный способ компенсации реактивной мощности в первичной цепи асинхронных двигателей путем подключения конденсаторных устройств к статорной обмотке не позволяет воздействовать на характеристики двигателей с целью увеличения их тяговых усилий.

Кроме того, при продольной и поперечной компенсации в динамических режимах, характеризующихся изменением параметров системы, возникают нежелательные явления резонансного характера, приводящие к динамическим колебаниям.

Значительные массо-габаритные показатели общепромышленных конденсаторных устройств в значительной степени ограничивают область их использования для компенсации реактивной мощности электроприводов.

Способ компенсации реактивной мощности со стороны вторичной цепи асинхронной машины позволяет не только улучшить энергетические характеристики системы электропривода в целом, но и путем непосредственного воздействия на параметры вторичной цепи в широком диапазоне влиять на пусковые и рабочие характеристики электродвигателя. Для этого требуются весьма большие емкости - от сотых долей до десятков фарад, что ранее являлось препятствием широкому внедрению компенсации реактивной мощности асинхронных двигателей со стороны вторичной цепи.

Создание и испытания ряда конструктивных модификаций новых компенсирующих устройств позволило повысить коэффициент мощности цилиндрических асинхронных двигателей вплоть до 1,0, а также получать режимы с генерацией в сеть опережающего тока.

В связи с этим, логичным шагом дальнейшего развития ЛАД представляется разработка конструктивного варианта, содержащего вторичную часть с обмоткой и КУ.

Согласно проведенным прогнозам энергетический фактор такого двигателя может быть получен на уровне 0,8 вместо существующего 0,3, а удельное тяговое усилие $(4-6) \times 10^4$ Н/м² вместо $1,0 \times 10^4$ Н/м².

Применение компенсирующих устройств во вторичных цепях асинхронных двигателей открывает новые возможности при их проектировании и оптимизации и позволяет снять ряд ограничений, накладываемых на выбор их главных размеров и параметров. При этом требуется новый подход к проектированию двигателя, учитывающий специфику свойств компенсирующих устройств и их влияние на характеристики двигателя.

Ожидается, что применение КУ позволит:

- 1) повысить при необходимости воздушный зазор;
- 2) снизить, полностью скомпенсировать или перекомпенсировать индуктивные сопротивления двигателя и тем самым оптимизацию обмоток осуществлять по критерию минимума их активных сопротивлений;
- 3) повысить перегрузочную способность двигателя, причем обеспечить ее повышение при низких частотах управления;
- 4) снизить потери от высших временных гармоник, вызванных несинусоидальностью напряжения питания.

Указанные преимущества двигателя достигаются путем создания на основе КУ новых типов роторов, конструктивные схемы которых кратко описаны ниже.

Улучшить пусковые свойства, повысить перегрузочную способность и коэффициент мощности асинхронного двигателя удается путем использования в нем короткозамкнутого ротора, выполненного в соответствии с авторским свидетельством N 97851 от 03.08.1976 г. по заявке N 1590015 от 21.05.1975 г.

В таком роторе вместо обычных стержней "беличьей клетки" установлены конденсаторы, которым придана форма стержней "беличьей клетки". Выводные концы конденсаторов подсоединены к короткозамыкающим кольцам. Принципиальная конструктивная схема такого асинхронного двигателя приведена на рис. 33.

Для увеличения пускового момента и коэффициента мощности асинхронного двигателя при одновременном сохранении в номинальном рабочем режиме к.п.д. машины следует иметь повышенное значение вторичного активного сопротивления ротора r_2' и пониженное реактивное сопротивление x_2' . В двигателе с короткозамкнутым ротором эта задача может быть решена за счет выполнения вторичных обмоток с переменными параметрами, а в двигателе с массивным ротором - за счет использования поверхностного эффекта в ферромагнитном слое ротора. Таким требованиям отвечает короткозамкнутый ротор (рис. 34) с глубокими пазами и уложенными в них конденсаторами, внутренние активные поверхности которых расположены параллельно оси паза [32 - 38], а также ротор из массивного ферромагнитного материала со встроенными конденсаторами (рис. 35).

Для повышения коэффициента мощности двигателя с фазным ротором в пазы каждой из фазных обмоток ротора последовательно со стандартными секциями обмотки устанавливаются конденсаторы [32, 36]. Принципиальная конструктивная схема двигателя с фазным ротором и конденсаторами изображена на рис. 31.

3.3 Возможные варианты двигателей ОТС

Директором центра "Звездный мир" А.Э. Юницким заданы следующие основные характеристики ОТС и ее физической модели:

- 1) Географическая широта: от экватора до Северного или Южного полярного круга
- 2) Длина: 20000...40000 км
- 3) Линейный электродвигатель: мощность 1...10 кВт/пог.м (суммарная мощность 20...400 млн кВт)
- 4) Масса ротора-груза: 10...100 кг/пог.м (общая масса 0,2...4 млн.т)
- 5) Поперечный размер вакуумного канала: 20...30 см
- 7) Вакуум: 1...100 Па
- 8) Высота эстакады: 10...30 м
- 9) Скорость движения ротора: до 10 км/с
- 10) Основные параметры физической модели ОТС (гипернакопителя энергии):
 - 10.1. Место размещения под поверхностью земли (на глубине 10...100 м)
 - 10.2. Диаметр кольца накопителя 1...100 км/с
 - 10.3. Скорость движения ротора накопителя: 1...10 км/с
 - 10.4. Количество накапливаемой электрической энергии (кинетическая энергия ротора): 1...1000 млн кВтч
 - 10.5. Удельные характеристики накопителя (линейная масса, поперечные размеры, мощность привода и т.п.): как у ОТС.

В качестве альтернативных вариантов двигателей предлагаются следующие:

1. Синхронный двигатель
 - 1.1. с постоянными магнитами на роторе;
 - 1.2. со сверхпроводниковыми электромагнитами на роторе;
 - 1.3. с электромагнитами и емкостными накопителями ротора
2. Вентильный двигатель с исполнениями роторов по п. 1
3. Асинхронный двигатель
 - 3.1. с короткозамкнутым ротором;
 - 3.2. с фазным ротором;
 - 3.3. с компенсирующими устройствами в короткозамкнутом и фазном роторе;
 - 3.4. с массивным ферромагнитным ротором;
 - 3.5. с массивным ферромагнитным ротором и кольцами
 - 3.6. с ферромагнитным ротором, имеющим омедненную активную поверхность.

Проанализируем предложенные варианты.

Основным недостатком синхронного двигателя с указанными типами роторов является необходимость обеспечения возбуждения, т.е. наличие на роторе источника э.д.с. или н.с., что усложняет конструкцию ротора.

Постоянные магниты получают все возрастающее применение в электрических машинах, особенно авиационных, в связи с внедрением новых магнитотвердых сплавов и редкоземельных материалов с высокими магнитными свойствами. Однако стоимость их пока высока, производство ограничено, коэрцитивные силы недостаточны для создания электрических машин более 100 кВт.

Применение сверхпроводниковых электромагнитов на роторе возможно при обязательном условии: из-за невозможности размещения криогенного оборудования на роторе необходимо запитывать электромагнит током перед разгоном ротора. Ток должен поддерживаться на неизменном уровне в течение всего периода разгона, что требует наличия криостатов на роторе, усложняет его конструкцию и может ухудшить его механические свойства.

Оригинальным представляется исполнение ротора синхронного двигателя с электромагнитами, которые в совокупности могут представлять интегральную конструкцию в виде полюса нужной полярности.

Емкостные накопители выполняют функцию источника э.д.с. и должны обладать достаточным энергозапасом для поддержания тока возбуждения в электромагнитах в течение всего периода разгона.

Очевидно, что массо-габаритные показатели накопителей в этом варианте должны быть минимально возможными, что предполагает использование технологии конденсаторов с двойным электрическим слоем.

Дополнительным преимуществом этого варианта, как и варианта ротора с постоянными магнитами, является возможность повторного использования накопителей и магнитов по другому назначению после доставки на орбиту.

Вентильный двигатель отличается от синхронного схемой статора и наличием датчика положения ротора.

Поэтому ему присущи упомянутые свойства синхронного двигателя.

Варианты 3.4-3.6 роторов асинхронного двигателя мало отличаются друг от друга с точки зрения их влияния на его выходные характеристики. Наиболее простым из них является вариант 3.5 с массивным ферромагнитным ротором, он же имеет наибольший пусковой момент, но самые низкие энергетические показатели при малых скольжениях.

Лучшие энергетические показатели среди всех вариантов, (без учета варианта с компенсирующими устройствами) имеют двигатель с короткозамкнутым ротором и фазным ротором. Однако фазный ротор имеет более сложную конструкцию обмотки.

Особняком стоит двигатель, имеющий ротор с компенсирующими устройствами на основе конденсаторов с двойным электрическим слоем. Наличие компенсирующих устройств не приводит к усложнению как короткозамкнутого, так и фазного ротора, если компенсирующие устройства выполнить в виде встроенных элементов обмоток (см. раздел 3.2)

При этом, как отмечено в разделе 3.2, благодаря компенсации значительно улучшается коэффициент мощности двигателя.

Учитывая изложенное, а также рассмотренные в разделе 3.1 тенденции развития линейного электропривода, предпочтение при разработке электропривода ОТС должно быть отдано асинхронным двигателям с короткозамкнутым и фазным ротором, при необходимости снабженным компенсирующими устройствами.

3.4. Методические основы расчета и проектирования двигателя ОТС

Очевидно, что кроме обеспечения требуемых эксплуатационных качеств при разгоне заданного груза до заданной скорости, проектируемый двигатель ОТС должен иметь минимальную массу, габариты и стоимость.

Поставленная задача расчета и проектирования двигателя ОТС не является типовой, когда по известным аналогам и исходя из опыта проектирования электрических машин выбираются электромагнитные нагрузки, а из условий "соразмерности", технико-экономических и эксплуатационных требований ищутся основные размеры машины (диаметр и длина). Такая задача определения оптимальных размеров электрической машины была поставлена впервые М.Видмаром, В.А.Трапезниковым и И.М.Постниковым.

В настоящей работе ставится иная задача, поскольку основные размеры заданы, но при этом подлежат выбору напряжение, частота (число пар полюсов), электромагнитные нагрузки, зазор. Легко видеть, что существует множество расчетных решений и приходится действовать по принципу, сформулированному в свое время известным электромашиностроителем проф. А.Е.Алексеевым в трех словах: "задавайся", "проверяй", "исправляй".

Прежде всего отметим, что в рассматриваемой задаче оказывается известной так называемая постоянная Арнольда

$$C_A = \frac{D^2 \ell n}{P} = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 K_w B \delta A},$$

которая пропорциональна объему $D^2 \ell$ на единицу мощности, отнесенной к частоте вращения.

Обратная величина

$$K_A = \frac{1}{C_A}$$

называется коэффициентом использования, так как характеризует мощность на единицу частоты вращения, получаемую с единицы объема $D^2 \ell$ [141].

Далее отметим, что проектируемый двигатель значительно отстает от принципов соразмерности в принятом для цилиндрических машин понимании, так как длина $l=0,2$ м в 68 млн. раз меньше $D=13,7 \times 10^6$ м. Учитывая, что статор, как и ротор двигателя ОТС имеют форму колец, по-видимому, требуются критерии соразмерности, отличные от общепринятых. Например,

можно использовать коэффициент $\lambda = 1/\pi$, который характеризует соразмерность (геометрию) в пределах полного деления как цилиндрической, так и линейной машины. Его величина, как показано ниже в расчете двигателя, может быть выбрана близкой к рекомендуемому.

С другой стороны "постоянная" Арнольда на самом деле изменяется в широких пределах с мощностью машины, так как произведение $D^2 l n$ задано. Кроме того, выражение "постоянной" Арнольда не охватывает всех размеров двигателя и, в частности, не касается воздушного зазора, числа и размеров пазов, которые также влияют на параметры машины.

Расчет двигателя при отсутствии прототипа-задача неопределенная, в которой число неизвестных больше числа уравнений. Решение такой задачи методом вариантов трудоемко. Например, при двух неизвестных А и Вб необходимо выполнить "m²" расчетов, если для каждого неизвестного проверяется "m" вариантов.

Поэтому, в дальнейшем, когда определится структура всей системы ОТС и требуемые параметры ее отдельных подсистем, понадобится проведение оптимизационных расчетов двигателя с привлечением ЭВМ и методов оптимального проектирования с учетом ограничений эксплуатационного и технологического характера.

В настоящей работе, как упоминалось, используются элементы методики поверочного электромагнитного расчета асинхронного двигателя, с введением не принципиальных, с точки зрения расчета выходных параметров допущений. В частности, коэффициенты Кб, Коб₁, Коб₂ и др. приняты равными 1,0.

Формулы для расчета коэффициентов проводимостей рассеяния выведены, как известно, полуэмпирическим путем для цилиндрических машин "обозримых" размеров. Поэтому требуется выявить, например, на физической модели, влияние масштабного фактора и размерных соотношений на точность расчета по этим формулам.

Особое внимание при этом следует уделить определению коэффициента проводимости рассеяния лобовых частей короткозамкнутой клетки ротора, так как различные источники [133,141] рекомендуют различные друг от друга формулы.

Выбор зазора в двигателе определяется допустимой величиной тока холостого хода и коэффициента мощности при номинальной нагрузке, а также механическими условиями.

Максимальный коэффициент мощности равен:

$$\cos \varphi_{max} \approx \frac{X_M - X_K}{X_M + X_K}.$$

Для получения максимального коэффициента мощности необходимо, чтобы относительный намагничивающий ток был равен относительной реактивности короткого замыкания, т.е.

$$\frac{I_M}{I_N} = \frac{X_K [OM] I_N}{U_N} = \bar{X}_K.$$

Максимальный вращающий момент (тяговое усилие) или перегрузочная способность двигателя зависят от индуктивного сопротивления рассеяния $X_K = X_1 + X_2$: чем меньше X_K , тем больше эти показатели. Величину X_K в относительных единицах можно выразить в виде:

$$\frac{I_N X_K}{U_1} = \lambda \frac{A}{B\delta},$$

где U_1 - номинальное фазное напряжение; λ - коэффициент,

характеризующий магнитную проводимость рассеяния.

При выбранных значениях $R_n, U, \tau, 2P$ и произведения $AB\delta$, но при изменении отношения $A/B\delta$ (т.е. при изменении числа витков обмотки статора W), значение λ остается практически неизменным. Поэтому при необходимости повышения перегрузочной способности следует уменьшить отношение $\frac{I_n X_k}{U}$ путем увеличения $B\delta$ и уменьшения A .

Другим способом повышения перегрузочной способности является включение во вторичную цепь компенсирующих устройств на основе неполярных конденсаторов с двойным электрическим слоем, емкостное сопротивление которых снижает до требуемого уровня эквивалентное реактивное сопротивление вторичной цепи.

Одним из основных является вопрос выбора оптимальной частоты напряжения двигателя.

При заданных диаметре, длине и скорости вращения увеличение частоты путем повышения числа полюсов приводит к снижению полюсного деления и, следовательно, величины магнитного потока при неизменной индукции в зазоре, повышению удельных потерь в меди и магнитопроводе, степени заполнения активной зоны медью. В результате уменьшается величина потока на полюс, снижается высота сердечников статора и ротора, что в пределе открывает возможность замены активной пазо-зубцовой зоны на слой проводников обмотки, равномерно распределенных по периметру активных поверхностей статора и ротора в магнитоэлектрическом композите.

Учитывая сказанное, можно утверждать, что повышение частоты при приемлемых $\cos \varphi$ и к.п.д. может привести к снижению относительного объема и массы двигателя и, в конечном итоге, его стоимости. Как показано в разделе 4, повышение частоты ограничено при современном уровне преобразовательной техники величиной $f = 8$ кГц.

По методологии проектирования двигателя ОТС на данном этапе, когда отсутствуют проработки по магнитному подвесу, вакуумной системе и др. подсистемам, ограничимся следующими соображениями.

Во-первых, статор и ротор двигателя должны выполняться в виде идентичных сегментов, длина которых должна быть выбрана такой, чтобы обеспечить удобную сборку и стыковку друг с другом (рис. 59).

Во-вторых, по результатам анализа за основную следует признать конструкцию сегмента статора и ротора, которые образуют в поперечном сечении так называемый односторонний линейный синхронный двигатель, причем его индуктор (статор) размещен на эстакаде горизонтально, а ротор ("бегун") расположен над индуктором (рис. 59).

В третьих, в сегментах ротора должны быть предусмотрены стыковочные узлы и свободные места для размещения элементов магнитного подвеса того или иного типа.

В четвертых, в пределах полюсного деления и зубцового деления могут быть использованы рекомендации по проектированию традиционных цилиндрических и линейных машин, в частности по типу, схемам и исполнению обмоток, конфигурации паза и размещению в нем проводников, выбору изоляционных, магнитных и конструкционных материалов и др.

В заключение этого раздела обсудим некоторые подходы к проектированию линейных двигателей в сопоставлении с цилиндрическими.

Как цилиндрическую, так и линейную машину можно представить как совокупность взаимосвязанных магнитных и электрических цепей. Взаимодействие магнитного потока с током приводит к появлению электромагнитной силы. Ток в электрической цепи создает намагничивающую силу в магнитной цепи, в то время как изменение потока в магнитной цепи приводит к появлению э.д.с. в электрической цепи. Эффективность взаимного превращения тока и магнитного потока была бы весьма высокой, если бы не ограничения, обусловленные активным сопротивлением в электрической цепи и магнитным сопротивлением в магнитной цепи.

Поэтому можно представить, как считает Лэйтвейт, приведение этих двух сопротивлений как показатель "неэффективности" машины. Выражая активное и магнитное сопротивление через соответствующие длины (l_e, l_m), площади поперечного сечения (A_e, A_m) и удельные электрическую и магнитную проводимости (σ, μ), получим следующее выражение для коэффициента "неэффективности":

$$K_H = \frac{I_e I_m}{\sigma \mu A_e A_m}.$$

Можно показать, что размерность этого коэффициента-время, коэффициент же "активности" выражается в виде:

$$G = \frac{K}{K_H \times \text{время}} = (\omega \mu \sigma) \left(\frac{A_e A_m}{I_e I_m} \right).$$

Это выражение может использоваться в качестве упрощенного критерия для оценки электрических машин любой конструкции, особенно линейных. Из его анализа следует, что увеличение всех линейных размеров машины, например, в два раза, должно привести к четырехкратному увеличению коэффициента эффективности. Величины, входящие в первые скобки, зависят от частоты питающей сети и свойств материалов, из которых изготовлена машина. В линейных машинах, у которых зазор представляет основное магнитное сопротивление, $\mu \cong \mu_0$.

Лэйтвейт приводит также следующее выражение для коэффициента "эффективности":

$$G = K \frac{\tau^2 \cdot f}{\delta},$$

где синхронная скорость $v = 2 \tau f$, полюсное деление - τ , зазор - δ .

Из этого выражения следует, что "эффективность" двигателя повышается с увеличением частоты, если все остальные величины остаются постоянными. Но если сохранять скорость "v" неизменной, то более эффективной окажется двигатель с пониженной частотой и повышенным полюсным делением, так как полюсное деление входит в выражение для коэффициента "эффективности".

Предложенные Лэйтвейтом коэффициенты "эффективности" и "неэффективности" дополняют ряд коэффициентов Арнольда, Эссона, Видмара и др., традиционно используемых при "дизайнинге" электрических машин.

3.5. Расчет асинхронного двигателя ОТС и его анализ

По заданным параметрам ОТС проведем предварительные расчетные оценки требуемых мощности, тягового усилия и длительности разгона двигателя ОТС.

Примем массу ротора с грузом
 $m = 10 \text{ кг/м} \times 40 \times 10^6 \text{ м} = 400 \times 10^6 \text{ кг} = 0,400 \text{ млн тонн}$
 где $\pi D = 40 \times 10^6 \text{ м}$ - периметр планеты.
 Скорость ротора $V = 10^4 \text{ м/с}$.

При равноускоренном разгоне ротора со средним ускорением

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = 1 \text{ М/с}^2, \quad \Delta V = 10^4 \text{ м/с}$$

длительность разгона составит

$$\Delta t = 10^4 \text{ с} \cong 3 \text{ час.}$$

При этом двигатель должен развивать тяговое усилие
 $F_T = 400 \times 10^6 \text{ н} = 40 \text{ тыс. тонн}$

и пиковую мощность

$$P_2 = F_T V = 4 \times 10^{12} \text{ Вт} = 4 \text{ млрд. кВт}$$

Такие гигантские величины тягового усилия и мощности вряд ли являются приемлемыми, во всяком случае при современном уровне техники.

При длительности разгона $\Delta t = 300 \text{ час} = 12,5 \text{ суток}$ и ускорении $a = 0,01 \text{ м/с}^2$ тяговое усилие $F_T = 400 \text{ тонн}$ и мощность $P_2 = 40 \text{ млн. кВт}$.

Если задать массу ротора с грузом $m = 0,2 \times 10^9 \text{ кг} = 0,200 \text{ млн. тонн}$ и пиковую механическую мощность двигателя $P_2 = 4 \text{ млн. кВт}$, то аналогично получаем

$$\begin{aligned} F_T &= 4 \times 10^5 \text{ н} = 40 \text{ тонн;} \\ a &= 0,2 \times 10^{-2} \text{ м/с}^2; \\ t &= 5 \times 10^6 \text{ с} = 1388 \text{ ч} = 58 \text{ суток.} \end{aligned}$$

Для ориентировки в последующих расчетах примем этот вариант в качестве основного, а поперечный размер ротора зададим $l = 20 \text{ см}$.

Как указано выше, электромагнитный расчет двигателя ОТС проведем по формулам, используемым для вращающихся цилиндрических асинхронных машин.

Частота вращения ротора

$$n = \frac{V}{\pi D} = \frac{10^4}{40 \cdot 10^6} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ об/с.}$$

Для электрической машины известна формула, связывающая ее электромагнитные нагрузки с основными размерами

$$S = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} A B_s D^2 l n \text{ [Вт]},$$

где A - линейная нагрузка статора, А/м,

B_s - индукция в зазоре, Тл.

Так как основные размеры и частота вращения заданы, то

$$A B_s = \frac{S \sqrt{2}}{\pi^2 D^2 l n},$$

где $S = \frac{K_E P_2}{\cos \varphi \eta}$, а

коэффициент мощности $\cos \varphi$ и к.п.д. двигателя предварительно задаются на основе пробных расчетов.

$$K_E \approx 1 - 27 \frac{\delta}{\tau q K_{\delta 1}^2} \approx 0,8.$$

Для выбора обмоточных данных статора и ротора: числа зубцов, параллельных ветвей, пазов на полюс и фазу, эффективных проводников в пазу - необходимо, кроме расчета электромагнитных нагрузок А и Вб, проанализировать следующие параметры.

1. Отношение

$$\lambda = \frac{\ell}{\tau},$$

где τ - полюсное деление.

Выбор λ зависит от многих условий и для крупных асинхронных двигателей традиционной конструкции

$\lambda = 0,9 - 2,0$, причем большие значения λ выбираются при большом числе полюсов.

Оптимальные величины перегрузочной способности и коэффициента мощности двигателя, получаются приблизительно при $\lambda = 1 - 1,3$. Оптимальные машины по массе меди и потерям получаются при $\lambda = 1,5 - 30$.

2. Индуктивное сопротивление взаимной индукции

$$X_{\mu} = \frac{4,8}{10^6} \times \frac{\tau \ell W_1^2 f_1 K_{\delta 1}^2}{K_{\delta 1} \cdot K_{\mu} \cdot \delta \cdot p}.$$

3. Отношение намагничивающего тока к полному току первичной цепи двигателя

$$\frac{I_{\mu}}{I_H} = 1,78 \frac{K_{\mu} \cdot K_{\delta}}{K_{\delta 1}} \times \frac{\delta}{\tau} \times \frac{W_{\delta}}{A}.$$

Отсюда следует, что при увеличении Вб и уменьшении А отношение I_{μ}/I_H возрастает и, следовательно, коэффициент мощности ухудшается.

При заданных величинах Вб и А коэффициент мощности тем выше, чем меньше отношение δ/τ .

4. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_1 = 0,158 \frac{f_1}{100} \left(\frac{W}{100} \right)^2 \frac{\ell}{p q} \lambda_1.$$

Оно должно быть по возможности минимальным по сравнению с сопротивлением взаимной индукции.

5. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора с короткозамкнутой клеткой

$$X_2 = 7,9 f_1 \ell \lambda_2 \cdot 10^{-8};$$

с фазной обмоткой

$$X_2 = 0,158 \frac{f_1}{100} \left(\frac{W_2}{100} \right)^2 \frac{\ell}{p q_2} \lambda_2.$$

Приведенные значения этих сопротивлений также должны быть минимально возможными по сравнению с сопротивлением взаимной индукции.

6. Потери в меди статора и ротора $P_{\mu_1} = m_1 I_1^2 r_1$

и $P_{\mu_2} = m_2 I_2^2 r_2$

должны не превышать допустимых величин, исходя из заданного предварительно к.п.д. двигателя.

7. Число пар полюсов

$$p = \frac{f}{n}$$

8. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}$$

Первый вопрос, который возникает при анализе приведенных параметров, возможно ли выполнение ЛАД ОТС при частоте питающего тока 50 Гц?

Оказывается, из-за большого полюсного деления $\tau = 100$ м, соответствующего частоте 50 Гц, не удастся обеспечить необходимое соотношение индуктивных сопротивлений взаимной индукции и рассеяния из-за повышенных проводимостей рассеяния лобовых частей обмоток и значительных магнитных напряжений вдоль протяженных линий магнитной индукции в магнитопроводе. Отношение λ при этом далеко выходит за рамки рекомендуемых значений ($\lambda = 2 \times 10^{-3} \ll 1$) для обеспечения приемлемого коэффициента мощности и к.п.д.

Аналогичная ситуация сохраняется при повышении частоты до 400 Гц, выбор которой был бы целесообразен с точки зрения использования опыта авиационного электромашиностроения и применения авиационного электрооборудования.

Выбор напряжения двигателя, главным образом, диктуется при заданной мощности приемлемым уровнем потерь в меди. Оно должно составлять не менее десятков киловольт и ограничиваться сверху электрической прочностью изоляции в зонах пазовой и лобовой частей обмотки.

Если исходить из обеспечения приемлемых величин коэффициента мощности и к.п.д. двигателя, отношение должно быть равно 1,3-1,5. Такому отношению соответствует частота питающего тока до 40 кГц. Учитывая, что в настоящее время и в ближайшей перспективе не предполагается разработка электропромышленностью электромеханических и статических преобразователей частотой на выходе до 40 кГц, выбираем ее величину 8 кГц. Такая частота близка к предельной для выпускаемых в стране преобразователей (см. раздел 4).

Как показали прикидочные расчеты по формулам 1...8 и поверочный электромагнитный расчет, проведенный ниже (раздел 3.5), при выбранной частоте 8 кГц и линейном напряжении 38,5 кВ удастся обеспечить приемлемые характеристики двигателя ОТС.

Следует отметить, что в данной работе не ставилась задача детального и точного электромагнитного расчета двигателя, а преследовалась цель доказать принципиальную возможность выполнения двигателя ОТС асинхронного типа. Кроме того, такие расчеты на данном этапе лишены практического смысла, так как конструкция двигателя не увязана с другими подсистемами (например, подвеса, вакуумной оболочки). Не выбрана окончательно также конструкция ротора как носителя полезного груза и т.п.

Однако уже на данном этапе можно дать важные оценки и выводы по предлагаемому двигателю.

1. Двигатель слабо нагружен в электромагнитном и тепловом отношении. Действительно (при $I_1 = 0,2 \times 10^6$ А):

-линейная нагрузка статора

$$A = \frac{I_1 S_n}{d t_1} = \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 1}{14 \cdot 10^3 \cdot 0,1} = 142 \text{ А/м,}$$

-индукция в зазоре

$$B\delta = 15,7 \times 10^{-4} \text{ Тл;}$$

-плотность тока в обмотке статора

$$j_1 = \frac{I_1}{d S_{c1}} = \frac{0,2 \cdot 10^6}{14 \cdot 10^3 \cdot 11} = 1,3 \text{ А/мм}^2;$$

-плотность тока в стержнях короткозамкнутой клетки

$$j_2 = \frac{I_2}{S_2} = \frac{15}{46} = 0,33 \text{ А/мм}^2;$$

-плотность тока в фазной обмотке ротора

$$j = 1,3 \text{ А/мм}^2.$$

Приведенные значения электромагнитных нагрузок существенно ниже уровня, достигнутого в высокоиспользованных электрических машинах.

Низкий уровень электромагнитных нагрузок обусловлен необходимостью обеспечения приемлемых потерь в меди и стали при высокой частоте $f = 8 \text{ кГц}$. Как известно, добавочные потери в меди обмоток и потери в стали магнитопровода являются степенными функциями от индукции и частоты.

2. Благодаря низким значениям индукции в зазоре и магнитопроводе открывается благоприятная возможность выполнения магнитопровода из композиционных материалов типа магнитоэлектриков, а отдельные секции статора и ротора длиной в несколько полюсных делений изготавливать в виде беспазовых монолитных блоков с распределенными по активным поверхностям проводниками обмоток. Возможен также вариант выполнения секций статора двигателя в виде железобетонных блоков, в пазах которых расположены секции обмотки.

3. Зазор двигателя ($\delta = 1 \text{ см}$), выбранный из условия обеспечения отношения намагничивающего тока к полному току статора $\frac{I_m}{I_1} < 0,4$ предъявляет высокие требования к подвесу ротора с точки зрения демпфирования возможных поперечных колебаний, приводящих к задеванию ротора о статор.

4. При выбранных низких плотностях тока в обмотках двигателя не требуется специальной системы его охлаждения. Однако с учетом работы двигателя в вакуумированном канале, когда конвективный теплообмен затруднен, в дальнейшем это необходимо подтвердить тепловым расчетом динамики роста температур в статоре и роторе за период разгона.

5. Если считать, что собственно ротор двигателя представляет собой конструкцию из активных материалов (меди и ферромагнетика), то как следует из расчета, полезный груз составит не менее 100 тыс. тонн. Очевидно, что "конструктив" этого груза должен быть специально разработан в зависимости от его назначения.

6. Фазное исполнение ротора с волновой обмоткой выгодно отличается от исполнения с короткозамкнутой клеткой по коэффициенту мощности вторичной цепи двигателя за счет пониженного индуктивного сопротивления рассеяния X_2 . Кроме того, фазная обмотка ротора может быть полностью унифицирована со статорной.

Вследствие этого коэффициент мощности двигателя с фазной обмоткой ротора выше, чем с короткозамкнутой.

7. Для повышения коэффициента мощности двигателя как с фазной обмоткой, так и с "беличьей" клеткой ротора, возможно применение встроенных в ротор компенсирующих устройств, выполненных на базе неполярных конденсаторов с двойным электрическим слоем. С этой целью в дальнейшем необходимо разработать методику и провести расчет требуемых параметров компенсирующих устройств и проработать конструкции, предложенные и коротко описанные в разделе 3.2.

3.6 РАСЧЕТНАЯ ЗАПИСКА

1. Исходные данные

Фазное напряжение	В	$U_{\text{ИН}}$	$38,5 \times 10^3$
Номинальная мощность	Вт	$P_{\text{Н}}$	3×10^9
Число фаз статора		m_1	3
Число фаз ротора		m_2	3
Частота вращения	об/с	n	$2,5 \times 10^{-4}$
Зазор	м	δ	0,01
Частота питания	Гц	f_1	8000

1. Статор

Длина статора	м	l	0,2
Число пар полюсов		p	32×10^6
$p = \frac{f}{n} = \frac{8000}{2,5 \cdot 10^{-4}} = 3,2 \cdot 10^6$			
Полюсное деление		τ	0,625
$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{40 \cdot 10^6}{64 \cdot 10^6} = 0,625$	м		
Число пазов на полюс и фазу		q_1	2
Число пазов статора		z_1	384×10^6
$z_1 = 2m_1 p q_1 = 2 \cdot 3 \cdot 32 \cdot 10^6 \cdot 2 = 384 \cdot 10^6$			
Зубцовое деление статора, м	м	t_1	0,1
$t_1 = \frac{\pi D}{z_1} = \frac{40 \cdot 10^6}{384 \cdot 10^6} = 0,104$			
Число параллельных ветвей		a_1	14×10^3
Число последовательных витков фазы статора (волновая обмотка)		w_1	4571
$w_1 = p q_1 \frac{S_{\text{п}1}}{a_1} = 32 \cdot 10^6 \cdot 2 \frac{1}{14 \cdot 10^3} = 4571$			
Магнитный поток	Вб	Φ	$1,37 \times 10^{-4}$
$\Phi = \frac{U_{\text{ИН}}}{4,44 f_1 w_1 K_{01}} = \frac{22,25 \cdot 10^3}{4,44 \cdot 8000 \cdot 4571}$			

Индукция в зазоре	Тл	B _δ	15,66x10 ⁻⁴
$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \tau_{\delta} K_{c1}} = \frac{1,37 \cdot 10^{-4}}{0,7 \cdot 0,625 \cdot 0,2}$			
Магнитное напряжение зазора	А	F _δ	25,1
$F_{\delta} = 1,6 B_{\delta} \delta K_{\delta} \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 15,66 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-2} \cdot 10^6$			
Общий коэффициент насыщения		K _μ	1,16
$K_{\mu} = \frac{F}{F_{\delta}}$			
Индуктивное сопротивление взаимной индукции	Ом	X _μ	0,27
$X_{\mu} = \frac{4,8}{10^6} \cdot \frac{\tau_{\delta}^2 \ell_1 W_1^2 f_1 K_{\delta}^2}{K_{\delta}^2 K_{\mu} \delta \cdot \rho} = \frac{4,8 \cdot 0,625 \cdot 0,2 \cdot (4571)^2 \cdot 8000}{10^6 \cdot 1,16 \cdot 0,01 \cdot 32 \cdot 10^6}$			
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора	Ом	X ₁	0,03
$X_1 = 0,158 \frac{f_1}{100} \left(\frac{W_1}{100} \right)^2 \frac{\ell}{\rho q_1} \lambda_1 =$ $= 0,158 \cdot 80 \cdot (45,71)^2 \frac{1,2}{32 \cdot 10^6 \cdot 2} \cdot 3,68,$ где принято $\lambda_1 = 2 \lambda_{л1}; \ell - \text{в [см]}$			
Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора		λ _{л1}	1,84
$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q_1}{\ell} (\ell_{л1} - 0,64 \beta \tau) =$ $= 0,34 \frac{2}{0,2} (0,94 - 0,64 \cdot 0,625)$			
Длина лобовых частей	м	l _{л1}	0,94
$\ell_{л1} \cong 1,5 \tau = 0,94 \text{ м}$ β=1			
Активное сопротивление обмотки статора	Ом	r ₁	1,47x10 ⁻³
$r_1 = \frac{1}{46} \cdot \frac{h_1}{S_c \pi_{\text{эл}} q_1} = \frac{1}{46} \cdot \frac{10,42 \cdot 10^3}{\pi \cdot 14 \cdot 10^3}$			
где средняя длина полувитка обмотки статора	м	l _{ср}	1,14
$\ell_{ср} \cong \ell + 1,5 \tau = 0,2 + 1,5 \cdot 0,625$			
Сечение провода обмотки	мм ²	S _{c πэл}	11
Общая длина проводников фазы обмотки статора	м	L ₁	10,42x10 ³
$L_1 = 2W_1 \ell_{ср} = 2 \cdot 4571 \cdot 1,14$			

3. Ротор с короткозамкнутой клеткой

Число пазов ротора

Z₂

310 · 10⁶

Сопrotивление стержня клетки Ом	r_c	$10,3 \times 10^{-5}$
$Z_c = \rho \frac{l_2}{S_c} = \frac{1}{46} \cdot \frac{0,2}{42,0}$		
где сечение стержня мм ²	S_c	42
Сопrotивление кольца клетки Ом	r_k	$5,84 \times 10^{-5}$
$Z_k = \rho \frac{\pi D_k}{Z_2(aB)} = \frac{1}{46} \cdot \frac{40 \cdot 10^6}{310 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 8}$		
Сопrotивление фазы ротора Ом	r_2	4×10^{-4}
$Z_2 = Z_c + \frac{2Z_k}{\Delta^2} = 10,3 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 5,84 \cdot 10^{-5}}{0,4}$		
где $\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} = 0,64$		
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора Ом	X_2	0,140
$X_2 = 7,9 f_1 l \lambda_2 \cdot 10^{-8} = 7,9 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 11,1 \cdot 10^{-8}$		
где коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки ротора (размеры в см)		
$\lambda_{12} = \frac{2,3 D_k}{Z_2 l \Delta^2} l_g \frac{4,7 D_k}{a + 2B} =$	λ_2	11,10
$= \frac{2,3 \cdot 127 \cdot 10^8}{310 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 0,4} l_g \frac{4,7 \cdot 127 \cdot 10^8}{9,6 + 1,6}$		
Кoeffициент приведения	K_{np}	0,81
$K_{np} = \frac{4m_1 (W_1 K_{o1})^2}{Z_2} = \frac{4 \cdot 3 (4,571)^2 \cdot 10^6}{310 \cdot 10^6}$		
Сопrotивление фазы ротора, приведенное к статору Ом	r_2'	$3,24 \times 10^{-4}$
$Z_2' = K_{np} Z_2 = 0,81 \cdot 4 \cdot 10^{-4}$		
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к статору Ом	X_2'	0,11
$X_2' = K_{np} X_2 = 0,81 \cdot 0,14$		
Кoeffициент рассеяния	σ	1,11
$\sigma \cong 1 + \frac{X_1}{X_\mu} = 1 + \frac{0,03}{0,27}$		

Параметры П-образной схемы замещения

$R_1 = \sigma_1 \cdot r_1 = 1,11 \times 1,44 \times 10^{-3}$	Ом	R_1	$1,6 \times 10^{-3}$
$X_1 = \sigma_1 \cdot x_1 = 1,11 \times 30 \times 10^{-3}$	Ом	X_1	33×10^{-3}
$X_2 = \sigma_2^2 \cdot x_2 = 1,23 \times 0,11$	Ом	X_2	0,135
$R_2 = \sigma_2^2 \cdot r_2 = 1,23 \times 0,324 \times 10^{-3}$	Ом	R_2	$0,4 \times 10^{-3}$
Потери в меди статора $P_{M1} = m_1 I_1^2 Z_1 = 3 (0,17)^2 \cdot 10^6 \cdot 1,47 \cdot 10^{-3}$	Вт	P_{M1}	$0,127 \times 10^9$ Вт
(задан ток статора $I_1 = 0,17 \times 10^6$ А)			
Потери в меди ротора $P_{M2} = Z_2 I_2^2 Z_2 = 3 \cdot 10 \cdot 10^6 (12,8)^2 \cdot 4 \cdot 10^{-4}$, где ток ротора $I_2 = I_1 = K_L I_1 \frac{\sigma_{W1} K_{01}}{Z_2} = 0,85 \cdot 0,17 \cdot 10^6 \frac{6 \cdot 4571}{310 \cdot 10^6}$	Вт	P_{M2}	$0,2 \times 10^8$
Потери в стали принимаем $P_c = 0,2 \cdot 10^9$	Вт	P_c	$0,2 \times 10^9$
Электромагнитная мощность $P_{ЭМ} = P_1 - P_{M1} - P_c = 3 \cdot 22,25 \cdot 10^3 \cdot 0,17 \cdot 10^6 \cdot 0,4 - 0,127 \cdot 10^9 - 0,2 \cdot 10^9 = 4,54 \cdot 10^9 - 0,324 \cdot 10^9$ (задан коэфф. мощности $\cos \varphi_1 = 0,4$)	Вт	$P_{ЭМ}$	$4,216 \times 10^9$
Полезная мощность при подсинхронной скорости $P_2 = P_{ЭМ} - P_{M2} = 4,216 \cdot 10^9 - 0,2 \cdot 10^8$	Вт	P_2	$4,2 \times 10^9$
Скольжение при подсинхронной скорости		S_H	$4,74 \times 10^{-3}$
К.П.Д. без учета добавочных потерь (оценка) $\eta_H = \frac{P_2}{P_1} = \frac{4,2 \cdot 10^9}{4,54 \cdot 10^9}$		η_H	0,925
Активное сопротивление главной ветви П-образной схемы замещения при $S = S_H$ $R_S = R_1 + \frac{R_2}{S} = 1,6 \cdot 10^{-3} + \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{4,74 \cdot 10^{-3}}$	Ом	R_S	0,086

Индуктивное сопротивление главной ветви	Ом	X_S	0,168
$X_S = X_K = X_1 + X_2 = 33 \cdot 10^{-3} + 135 \cdot 10^{-3}$			
Полное сопротивление главной ветви	Ом	Z_S	0,189
$Z_S = \sqrt{R_S^2 + X_S^2} = \sqrt{(0,086)^2 + (0,168)^2}$			
		$\cos \varphi_2'$	0,45
		$\sin \varphi_2'$	0,888
Ток главной ветви	А	I_2''	$0,118 \times 10^6$
$I_2'' = \frac{U_1}{Z_S} = \frac{22,25 \cdot 10^3}{0,189}$			
Активная составляющая тока статора	А	I_{Ia}	$0,05 \times 10^6 \cdot 3$
$I_{Ia} \cong I_2'' \cos \varphi_2' = 0,118 \cdot 10^6 \cdot 0,45$			
Индуктивная составляющая тока статора	А	I_{Ip}	$0,179 \times 10^6$
$I_{Ip} = I_{I\mu} + I_2'' \sin \varphi_2' = 0,074 \cdot 10^6 + 0,118 \cdot 10^6 \cdot 0,888$			
где намагничивающий ток	А	$I_{I\mu}$	$0,074 \times 10^6$
$I_{I\mu} \cong \frac{U_1}{X_1 + X_{\mu}} = \frac{22,25 \cdot 10^3}{0,03 + 0,27}$			
Ток статора	А	I_1	$0,186 \times 10^6$
$I_1 = \sqrt{I_{Ia}^2 + I_{Ip}^2} = \sqrt{(0,053^2 + 0,179^2)} \cdot 10^6$			
Коэффициент мощности		$\cos \varphi_1$	0,28
$\cos \varphi_1 = \frac{I_{Ia}}{I_1} = \frac{0,053 \cdot 10^6}{0,186 \cdot 10^6}$			
4. Масса статора и ротора			
Масса меди статора	кг	M_{Mc}	$0,43 \times 10^8$ (43 тыс. т)
$M_{Mc} = Z_1 S_{D1} n_{эл} S_c \ell_{ср} \gamma_M \cdot 10^{-5} =$ $= 384 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 11 \cdot 114 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5}$			
Масса стержней клетки ротора	кг	M_c	$0,23 \times 10^8$ (23 тыс. т)
$M_c = Z_2 S_{ст} \ell \gamma_M \cdot 10^{-5} = 310 \cdot 10^6 \cdot 42 \cdot 20 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5}$			
Масса колец клетки ротора	кг	M_K	$0,34 \times 10^8$ (34 тыс. т)
$M_K = 2\pi D_K S_K \gamma_M \cdot 10^{-5} = 2 \cdot 40 \cdot 10^8 \cdot 48 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5}$			
Масса клетки ротора	кг	$M_{Kл}$	$0,57 \times 10^8$

4. РОТОР С ВОЛНОВОЙ ОБМОТКОЙ

Параметры Т-образной схемы замещения

$X_1 = X_2'$	Ом	Z_1	$1,44 \times 10^{-3}$
$Z_1 = Z_2'$	Ом	X_1	0,03
$R_{M1} = R_{M2}$	Ом	$K_{пр}$	1
$\epsilon_1 = 1,11$	Ом	X_2'	0,03
	Ом	r_2'	$1,44 \times 10^{-3}$

Параметры П-образной схемы замещения

	Ом	X_{μ}	0,27
	Ом	R_1	$1,6 \times 10^{-3}$
	Ом	R_2	$1,77 \times 10^{-3}$
	Ом	X_2	0,036
	Ом	X_1	0,033
	Ом	X_S	0,069
$X_S = X_K = X_1 + X_2$			
$P_1 = \sqrt{3} U_{1H} I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \cdot 38,5 \cdot 10^3 \cdot 0,17 \cdot 10^6 \cdot 0,7$	Вт	P_1	$7,92 \times 10^9$

где принято $\cos \varphi_1 = 0,7$

$P_{ЭМ} = P_1 - P_{M1} - P_c = (7,92 - 0,124 - 0,2) \cdot 10^9$	Вт	$P_{ЭМ}$	$7,6 \times 10^9$
$P_2 = P_{ЭМ} - P_{M2} = (7,6 - 0,124) \cdot 10^9$	Вт	P_2	$7,47 \times 10^9$
$S = \frac{P_{M2}}{P_{ЭМ}}$		S	0,0163

$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{7,47 \cdot 10^9}{7,92 \cdot 10^9}$ (оценка)	η	0,943
---	--------	-------

$R_S = R_1 + \frac{R_2}{S} = 1,6 \cdot 10^{-3} + \frac{1,77 \cdot 10^{-3}}{16,3 \cdot 10^{-3}}$	Ом	R_S	0,110
---	----	-------	-------

$Z_S = \sqrt{R_S^2 + X_K^2} = \sqrt{(0,11)^2 + (0,069)^2}$	Ом	Z_S	0,129
--	----	-------	-------

$I_2'' = \frac{U_1}{Z_S} = \frac{22,25 \cdot 10^3}{0,129}$	А	I_2''	$0,172 \times 10$
--	---	---------	-------------------

$\cos \varphi_2' = \frac{R_S}{Z_S} = \frac{0,11}{0,129}$	$\cos \varphi_2'$	0,852
--	-------------------	-------

$$\sin \varphi_2' = \frac{X_s}{Z_s} = \frac{0,069}{0,129}$$

$$\sin \varphi_2' \quad 0,535$$

$$I_{1a} = I_2'' \cos \varphi_2' = 0,172 \cdot 10^6 \cdot 0,852 \quad \text{A}$$

$$I_{1a} \quad 0,146 \times 10^6$$

$$I_{1p} = I_{\mu} + I_2'' \sin \varphi_2' = 0,074 \cdot 10^6 + 0,172 \cdot 10^6 \cdot 0,535 \quad \text{A}$$

$$I_{1p} \quad 0,166 \times 10^6$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = \sqrt{(0,146)^2 + (0,166)^2} \cdot 10^6 \text{ A}$$

$$I_1 \quad 0,22 \times 10^6$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} = \frac{0,146 \cdot 10^6}{0,22}$$

$$\cos \varphi_1 \quad 0,664$$

Масса меди статора К2

$$\text{ММ.С.} \quad 0,43 \cdot 10^8 \\ (43 \text{ тв.с. Т})$$

Масса меди ротора К2

$$\text{ММ.Р.} \quad 0,43 \cdot 10^8 \\ (43 \text{ тв.с. Т})$$

5. ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Расчет токов, тяговых усилий (моментов), коэффициента мощности двигателя (ротор с волновой обмоткой) для значений $0 \leq S < 1$ производится аналогично вышеприведенному расчету тех же величин для $S=0,0163$. Результаты расчета показаны на рис. 60 в виде пусковых характеристик $I_1 = f(s)$, $\cos = f(s)$, $F = f(s)$.
Критическое скольжение

$$S_m = \frac{\sigma_1 x_2'}{\sqrt{x_1^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2}} = 0,025.$$

Электромагнитное тяговое усилие рассчитывается по формуле

$$F = \frac{m_1 U_1^2 R_2}{S V_c (R_s^2 + X_s^2)},$$

где

$$S = v \alpha \tau, \quad V_c = 10^4 \text{ м/с.}$$

Максимальное тяговое усилие получим, подставив $S = S_m$:

$$F_m = 10,4 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

Пусковое тяговое усилие ($S = 1$)

$$F_n = 0,54 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

Тяговые усилия на рабочем участке пусковой характеристики при скольжениях $S_1 = 7,5 \cdot 10^{-3}$ и $S_2 = 0,0163$ равны соответственно

$$F_{H1} = 5,7 \cdot 10^5 \text{ Н} \quad \text{и} \quad F_{H2} \cong 9,0 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

4. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ, ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕИ ЧАСТОТЫ, ВОПРОСЫ ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОТС.

В предыдущем разделе был выполнен электромагнитный расчет асинхронного двигателя ОТС, статорная обмотка которого имеет большое количество параллельных ветвей ($a_1=14000$) и повышенные значения питающего напряжения и частоты ($U_1=22,25 \times 10^3$ В, $f_1=8 \times 10^3$ Гц).

Первое обстоятельство можно считать благоприятным для системы электропитания, так как по количеству параллельных ветвей и суммарной мощности электродвигателя легко определить оптимальное количество каналов подвода энергии и мощности каждого канала, исходя из реальных возможностей реализации системы. Полная (кажущаяся) мощность электродвигателя:

$$S=3U_1 \cdot I_1 = 3 \times 22,25 \times 10^3 \times 186 \times 10^3 = 12,4 \times 10^9 \text{ Вт.}$$

Если принять за канал подвода электроэнергии одну параллельную ветвь статорной обмотки, то полная мощность одного канала будет равна:

$$S_k = \frac{S}{a_1} = \frac{12,4 \times 10^9}{14 \times 10^3} = 0,886 \times 10^6 \text{ Вт.}$$

Эта цифра в дальнейшем будет являться отправной при определении мощности преобразовательных устройств внутри каждого канала.

Повышенное значение фазного напряжения статорной обмотки в номинальном режиме работы электродвигателя $U_1=22,25$ кВ, хотя и накладывает дополнительные требования к системе электропитания, однако не является решающим фактором. Решающее значение имеет повышенная

Тиристорные преобразователи частоты серии ТПЧ и СЧИ

Тип	Номинальный ток на выходе	Номинальная мощность на выходе	Номинальная частота на выходе	Коэффициент мощности	Пределы регулирования напряжения	КПД	Габариты	Масса
	А	кВт	кГц		% $U_{ном}$	%	мм	кг
ТПЧ-800-1,0/0,5-2У4	1550	800	1,0	0,92	$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 2,5$	94	4000x800x2200	4200
ТПЧ-500-2,4-2У4	1250	500	2,4	0,92	10-50	91	4000x800x2440	2650
ТПЧ-250-2,4-2У4	530	250	2,4		0-50	92	2000x800x2440	1500
ТПЧ-250-8,0-2У4	650	250	8,0	0,9	0-50	85	2800x800x2440	3000
ТПЧ-630-1У4	1300	630	0,5; 1,0	0,94	$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 2,5$	94	5210x900x2470	4000
СЧИ-100/2,4	250	100	2,4	0,92	12,5-62,5	92	1845x1120x1700	1950

Примечания: 1) напряжение трехфазной питающей сети 380 В

2) номинальное напряжение на выходе ТПЧ 800 В, на выходе СЧИ 400 В

3) точность стабилизации выходного напряжения ТПЧ-800-1,0/0,5-2У4 и ТПЧ-630-1У4 $\pm 2\%$, ТПЧ-500(250)-2,4-2У4 и ТПЧ-250-8,0-2У4 - $\pm 1,5\%$

4) пределы изменения частоты на нагрузке 20% номинальной.

5) охлаждение для ТПЧ-630-1У4 - воздушное принудительное, для всех остальных - водяное.

частота питающего напряжения $f_1=8\text{кГц}$. Такая частота не является традиционной, как например, 50 Гц или 400 Гц, поэтому требуется либо разработка специальных высокочастотных преобразователей, либо использование уже имеющихся преобразовательных устройств, разработанных для других целей.

На первый взгляд наиболее заманчивым является использование статических преобразователей частоты (тиристорных и транзисторных), однако анализ существующего уровня развития таких преобразователей не позволяет сделать оптимистические выводы о применимости высокочастотных преобразователей для подобных целей. Одной из причин, препятствующих созданию преобразователей высокой частоты для электроприводов, является соизмеримость времени коммутации (включения-выключения) полупроводниковых приборов с длительностью полуволны выходного напряжения. Действительно, при частоте напряжения 8 кГц половина периода напряжения составляет всего 62,5 мкс. Выпускаемые в настоящее время силовые тиристоры восстанавливают свои запирающие свойства через несколько десятков микросекунд. Имеются частотные тиристоры с малым временем восстановления, однако они сравнительно маломощны. Но даже при наличии быстродействующих тиристоров форма выходного напряжения с длительностью полуволны 62,5 мкс будет неустойчива, частота будет колебаться и приводной двигатель будет работать в неустойчивом режиме с повышенными потерями энергии и другими неблагоприятными явлениями. Поэтому высокочастотные тиристорные преобразователи применяются главным образом для электротермических установок (табл.10).

Эти преобразователи изготавливаются в однофазном исполнении, имеют звено постоянного тока, снабжены системой автоматической стабилизации выходного напряжения в пределах 600-1000 В.

Что касается транзисторных преобразователей частоты, то, во-первых, они будут иметь почти такое же качество выходного напряжения, как у тиристорных преобразователей и, во-вторых, к настоящему времени в нашей стране не освоен выпуск мощных (сильноточных и высоковольтных) транзисторов необходимой надежности.

Анализ других известных типов преобразовательных устройств показал, что для рассматриваемой цели наиболее пригодным оказывается разработанный еще в прошлом веке индукторный генератор.

Одна из первых конструкций индукторной машины была предложена в 1854 г. Найтом [142]. Индукторные машины оказались весьма удобными источниками переменного тока для развивавшегося в то время электрического телеграфа. Поэтому в 50-60-х годах XIX века индукторные генераторы получили довольно быстрое развитие.

В последние годы электротехниками П.Н. Яблочковым (Patent N 3187, London, 1877), А. Клименко (Привелегия N3085, 1882), И. Зольманом (Привелегия N 1210), Г.Гюи, Е.Александрсеном, В.П.Воногиным предложен ряд оригинальных конструкций индукторных генераторов мощностью до 600 кВт на частоты до 20 кГц.

В последние годы индукторные генераторы стали широко применяться в авиации, электрометаллургии (закалка, плавка, сварка и т.д.), высокоскоростном электроприводе и т.д., где используются частоты от 0,2 до 10 кГц и где электрические машины сохраняют преимущества по сравнению с электронными устройствами.

В 50-60 г.г. Ленинградский з-д "Электрик" изготавливал индукторные генераторы мощностью до 100 кВа при частоте 8 кГц, заводы "Электросила" и ХЭМЗ мощностью до 1000 кВа при частоте до 10 кГц.

4
ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ВПЧ

№ № п.п.	ПАРАМЕТРЫ	ВПЧ-100-8000 -УХЛЧ
	Тип ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	
		Генератор
1	Выходная мощность, кВт	1000
2	Выходное напряжение, В	800/400
3	Ток, А	139/278
4	Выходная частота, Гц	8000
5	Мощность возбужд. не более, кВт	0,4 / 1,0
		Двигатель
6	Потребляемая мощн., кВт	135
7	Напряжение сети, В	380/220
8	Потребляемый ток, А	228/393
9	Коэффициент мощности	0,9
10	КПД, %	77
11	Расход воды, не более, л/мин	40

В настоящее время в стране выпускаются преобразователи повышенной частоты серии ППЧВ и ВПЧ ("Сибэлектротяжмаш"), предназначенные для питания электротермических установок. Они представляют собой агрегаты на базе приводного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и индукторного генератора повышенной частоты до 10 кГц. Двигатель допускает два прямых пуска не ниже 0,5 номинального при отключенной нагрузке и снятом возбуждении генератора.

Преобразователи снабжены воздушно-водяной системой охлаждения с замкнутым циклом по воздуху и разомкнутым по воде (двигатель охлаждается воздухом, генератор-водой и воздухом)

На рис. 36 показана принципиальная схема преобразователя, а в таблицах приведены технические характеристики двигателей генераторов и преобразователей в целом.

В таблице 11 даны параметры преобразователя выходной мощностью 100 кВт при частоте 8 кГц и выходном напряжении 800 В, а в табл. 12 выделены два столбца с параметрами преобразователей мощностью по 250 кВт при частоте 10 кГц и том же напряжении.

Максимальная мощность преобразователей составляет 500 кВт при частоте 3,87 кГц и выходном напряжении 800/1600 В.

Преобразователи допускают параллельную работу, поэтому максимальная мощность одного канала подвода электроэнергии не имеет ограничений. На данном этапе удобнее считать, что количество каналов равно числу параллельных ветвей статорной обмотки и мощность канала составляет 900 кВт. Последнее означает, что на каждый канал каждой фазы необходимо включить параллельно 3 шт. 100-киловаттных преобразователей.

Общее количество таких преобразователей для всего ОТС составляет 126×10^3 штук. Следует, естественно, помнить, что выходные напряжения преобразователей трех фаз должны быть сдвинуты относительно друг друга на 120 эл. градусов.

Возможен и другой путь использования электромеханических преобразователей, а именно: используя магнитопроводы серийных преобразователей, вместо однофазной выполнять трехфазную обмотку. В этом случае все преобразователи одного канала для трех фаз будут включаться параллельно и не придется обеспечивать фазировку выходных напряжений

По своим регулировочным характеристикам электропривод ОТС следует отнести к тяговым электроприводам, работающим с затяжным пуском. В рассматриваемом случае работа электропривода состоит из одного непрерывного пуска-разгона продолжительностью ~ 40 суток. Если преобразователь запустить путем прямого подключения асинхронного двигателя к питающей сети при снятом возбуждении генератора, то пуск тягового электродвигателя придется осуществить путем плавного увеличения напряжения генератора при номинальной частоте статора. Это равноценно пуску асинхронного электродвигателя от индукционного регулятора, что, как известно, снижает пусковой момент пропорционально $(U_1/U_{1H})^2$. Форсирование увеличения напряжения приведет к повышенным потерям и перегреву асинхронной машины.

Таким образом, с полной уверенностью можно заключить, что осуществление прямого пуска как тягового асинхронного электродвигателя ОТС при работающем электромеханическом преобразователе, так и разгона неподвижного тягового двигателя при прямом пуске преобразователя не возможны.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ серии ППЧВ

Преобразователь

№№ п п	Параметры	ППЧВ 250-24-6000-УХЛ4;	ППЧВ-250-24-	250-24-380/660	250-40-6000 ;	250-4,0-	250-24-6000
		ППЧВ 250-24-3000-УХЛ4	380/660 УХЛ4		250-4,0-3000	380/660	250-24-3000
1	Полезная мощность, кВт	250	250	250	250	250	250
2	Потребляемая мощность, кВт	286	283	283	289	286	286
3	КПД, %	87,5	88,4	88,4	86,5	87,4	87,5
4	Частота вращения номинальная, с ⁻¹	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6
5	Расход охлаждающей воды, м ³ /с	1·10 ⁻³	1·10 ⁻³	1·10 ⁻³	1·10 ⁻³	1·10 ⁻³	1·10 ⁻³
6	Масса, кг не более	3000	3000	3000	2950	2950	3000
Генератор							
7	Частота номинальная, кГц	2,38	2,38	2,38	3,87	3,87	2,38
8	Напряжение, В	800 / 1600	800 / 1600	400 / 800	800	800	400 / 800
9	Напряжение на обмотке якоря, В	800 / 1600	800 / 1600	400 / 800	920	920	400 / 800
10	Ток, А	329 / 165	329 / 165	658 / 329	313	313	658 / 329
11	Коэффициент мощности (нагрузки)	0,95 емк.	0,95 емк.	0,95 емк.	1,0	1,0	0,95 емк.
12	Ток возбуждения, А	4,4-5,9/8,8-11,8	4,4-5,9/8,8-11,8	4,4-5,9/8,8-11,8	4,3-5,7/8,6-11,4	4,3-5,7/8,6-11,4	4,4-5,9/8,8-11,8
13	Напряжение возбуждения, В	70-110/35-55	70-110/35-55	70-110/35-55	80-130/40-65	80-130/40-65	70-110/35-55
14	Параметры последовательной емкости, Мкф	—	—	—	26,7	26,7	—
	напряжение, В	—	—	—	500	500	—
Двигатель							
15	Напряжение, В	6000 ; 3000	380 / 660	380 / 660	6000, 3000	380 / 660	6000 ; 3000
16	Ток, А	30,9 ; 61,8	476,1 / 274,9	476,1 / 274,9	31,3 ; 62,6	481,5 / 278,0	30,9 ; 61,8
17	Коэффициент мощности	0,89	0,9	0,9	0,89	0,9	0,89
18	Соединение фаз	Y ; YY	Δ / Y	Δ / Y	Y YY	Δ / Y	Y ; YY
19	Пусковой ток при номинальном напряжении, А	155 , 310	2510 ; 1450	2510 , 1450	155 , 310	2510 , 1450	155 ; 310
20	Время пуска при номинальном напряжении, с	18	17	17	18	17	18

Преобразователь

-250-24-60 УХЛЧ	250-24-380/660	250-40-6000; 250-4,0-3000	250-4,0-380/660	250-24-6000; 250-24-3000	250-10-6000; 250-10-3000	250-10-380/660	500-1-6000; 500-1-3000	500-2,4-6000 500-2,4-3000	500-4-6000 500-4-3000
250	250	250	250	250	250	250	500	500	500
283	283	289	286	286	304	301	551	562	571
88,4	82,4	86,5	87,4	87,5	82,3	83,1	90,7	89,0	87,5
49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,7	48,7	49,7
$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-3}$
000	3000	2950	2950	3000	3020	3020	3970	4390	4280

Генератор

38	2,38	3,87	3,87	2,38	10,0	10,0	1,09	2,38	3,87
0/1600	400/300	800	800	400/300	800	800	800/1600	800/1600	800/1600
0/1600	400/800	920	920	400/800	960	960	800/1600	800/1600	920/1840
9/165	658/329	313	313	658/329	329	329	626/313	658/329	626/313
0,95 емк.	0,95 емк.	1,0	1,0	0,95 емк.	0,95 умд.	0,95 умд.	1,0	0,95 емк.	1,0
9/8,8-11,8	4,4-5,9/8,8-11,8	4,3-5,7/8,6-11,4	4,3-5,7/8,6-11,4	4,4-5,9/8,8-11,8	3,6-6,8/7,2-13,6	3,6-6,8/7,2-13,6	5,7-7,2/4,4-11,4	4,5-6,0/9,0-12	4,4-5,7/8,8-11,4
10/35-55	70-110/35-55	80-130/40-65	80-130/40-65	70-110/35-55	83-183/42-92	83-183/42-92	170-235/85-113	90-134/45-67	100-150/50-75
—	—	26,7	26,7	—	6,2	5,2	—	—	51,3/12,8
—	—	500	500	—	835	835	—	—	500/1000

Двигатель

7/660	380/660	6000, 3000	380/660	6000; 3000	6000; 3000	380/660	6000; 3000	6000; 3000	6000; 3000
1/274,9	476,1/274,9	31,3 ; 62,6	481,5/278,0	30,9 ; 61,8	32,9 ; 65,8	506,5/292,4	58,9 ; 117,8	60,1 ; 120,2	61,1 ; 122,2
9	0,9	0,89	0,9	0,89	0,89	0,9	0,9	0,9	0,9
Y	Δ/Y	Y YY	Δ/Y	Y; YY	Y; YY	Δ/Y	Y; YY	Y; YY	
1450	2510, 1450	155, 310	2510, 1450	155 ; 310	155 ; 310	2510, 1450	320 ; 640	320 ; 640	
7	17	18	17	18	21	25	13	16	

Необходимы технические решения, обеспечивающие плавный и экономичный пуск ОТС с оптимальной загрузкой всех узлов системы электроснабжения, включая и первичную питающую сеть.

Академик М.П. Костенко сформулировал следующие правила регулирования скорости асинхронного привода [47]:

" Если сконструировать асинхронный двигатель для частоты f_{1H} , моменты M_H и напряжения на зажимах U_{1H} и изменять затем при частоте f_1 и моменте M напряжение U_1 таким образом, чтобы всегда было удовлетворено соотношение:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} \sqrt{\frac{M}{M_H}}, \quad (1)$$

то двигатель будет работать при практически неизменном коэффициенте устойчивости, неизменном $\cos \varphi$ и постоянном абсолютном скольжении и коэффициенте полезного действия, зависящем только от изменения частоты и не зависящем от изменения момента на валу, если насыщение магнитной системы не слишком велико."

Для наиболее часто встречающихся на практике случаев зависимости момента на валу от скорости вращения (или, что почти то же самое, от частоты тока статора f_1) в табл.13 указаны вытекающие из выражения (1) законы регулирования. Там же указаны зависимости полезной мощности P_2 , магнитного потока Φ и тока статора от частоты тока статора.

Табл. 13

	$\frac{M}{M_H}$	$\frac{U_1}{U_{1H}}$	$\frac{P_2}{P_{2H}}$	$\frac{\Phi}{\Phi_H}$	$\frac{I_1}{I_{1H}}$
Постоянная мощность $M = M_H \cdot \frac{f_{1H}}{f_1}$	$\frac{f_{1H}}{f_1}$	$\sqrt{\frac{f_1}{f_{1H}}}$	const	$\sqrt{\frac{f_{1H}}{f_1}}$	$\sqrt{\frac{f_{1H}}{f_1}}$
Постоянный момент $M = M_H = \text{const}$	const	$\frac{f_1}{f_{1H}}$	$\frac{f_1}{f_{1H}}$	const	const
Вентиляционный закон $M = M_H \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2$	$\left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2$	$\left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2$	$\left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^3$	$\frac{f_1}{f_{1H}}$	$\frac{f_1}{f_{1H}}$

Приведенные соотношения справедливы для идеализированного электродвигателя, в котором не учитываются насыщение магнитной системы и активное сопротивление обмоток. В реальном двигателе необходимо так регулировать напряжение в функции частоты, чтобы магнитный поток менялся по указанному в табл.13 закону. Это значит, что при малых частотах напряжение на зажимах двигателя U_1 должно превосходить величину, полученную из выражения (1).

Возможны, естественно, и другие законы регулирования, например, по максимальному КПД. Поскольку минимальные потери в асинхронном двигателе возникают при определенном оптимальном значении частоты тока ротора $f_{2\text{опт}}$, то с изменением частоты статора f_1 так меняют напряжение, чтобы обеспечить работу двигателя при $f_{2\text{опт}}$. [52,58]. При замкнутой системе регулирования напряжение и частоту можно регулировать по любому закону. Из приведенных в таблице законов регулирования закон постоянства мощности и вентиляторный закон для разгона ОТС являются неприемлимыми из-за чрезмерно больших пусковых токов и моментов в первом случае и из-за чрезмерно малого пускового момента во втором случае. Как и в традиционном тяговом приводе (например на железнодорожном подвижном составе), в рассматриваемом случае наиболее пригоден закон пуска с постоянным моментом. Он прост в реализации, не требует увеличения установленной мощности электрооборудования привода.

Таким образом, для регулирования в широких пределах скорости асинхронного электропривода необходимо регулирование в тех же пределах напряжения и частоты.

С учетом принятого решения об использовании в качестве регулируемого по напряжению и частоте источника электропитания индукторного генератора блок-схему канала подвода к тяговому двигателю ОТС энергии можно представить следующим образом.

Вариант 1 (рис 37 ,а). индукторный генератор ИГ приводится во вращение "штатным" асинхронным двигателем АДИГ с короткозамкнутым ротором, питание которого осуществляется от сети переменного тока через непосредственный преобразователь частоты НПЧ. Регулирование выходного напряжения и частоты индукторного генератора осуществляется посредством регулирования возбуждения и частоты вращения. Так как номинальное напряжение индукторного генератора составляет 800 В, между ними и тяговым электродвигателем АДОТС необходимо включить повышающий трансформатор Тр. На схеме (рис.37, а) индукторный генератор изображен в трехфазном исполнении в виде одного агрегата.

Фактически же это будет либо группа параллельно включенных трехфазных генераторов, либо три группы генераторов той же суммарной мощности, питающих отдельно каждую фазу АДОТС однофазным напряжением со сдвигом на 120 эл. градусов.

Следует отметить одну особенность рассмотренной блок-схемы: приводной асинхронный двигатель АДИГ по своей сути также является тяговым, как и АДОТС и должен регулироваться по тяговым законам. Суммарная активная мощность АДИГ всех каналов подвода энергии к АДИГ больше мощности тягового двигателя АДОТС на величину потерь в нем самом, в повышающих трансформаторах и индукторных генераторах.

Вариант 2 (рис, 37 ,б). Индукторный генератор приводится во вращение "штатным" асинхронным двигателем АДИГ, питание которого осуществляется от автономного инвертора И через звено постоянного тока, состоящего из выпрямителя В и фильтра Ф. От инвертора И, как и от непосредственного преобразователя частоты в предыдущем варианте, на двигатель АДИГ подается напряжение, регулируемое по амплитуде и частоте в соответствии с заданным законом. Возможны два способа регулирования напряжения и частоты: раздельный и совмещенный.

При раздельном способе на инвертор И возлагается регулирование частоты, а на выпрямитель В - регулирование напряжения. При совмещенном способе выпрямитель В выполняется неуправляемым с неизменным выходным напряжением, а инвертор И работает по методу широтноимпульсной модуляции (ШИМ) и выходное напряжение формируется в виде серии импульсов

неизменной амплитуды, но изменяющейся скважности. Вместо выпрямителя в этом случае может быть использован любой источник (сеть) постоянного тока. В мировой практике реализованы оба способа регулирования напряжения и частоты. В каждом отдельном случае отдельный и совмещенный способы регулирования имеют свои преимущества друг перед другом и на данном этапе не имеет смысла производить их анализ и выбор наиболее оптимального варианта. Это можно будет сделать на том этапе, когда будут проработаны схемные и конструктивные решения всех систем, начиная от электростанций и кончая определением мест расположения отдельных агрегатов по пути следования ротора ОТС.

Варианты 3 и 4. Индукторный генератор приводится во вращение не "штатным" асинхронным, а так называемым вентильным электродвигателем ВД. По своим характеристикам последний занимает промежуточное положение машиной постоянного тока и синхронной машиной.

Как и в случае асинхронной машины, вентильный электропривод может выполняться с преобразователем с непосредственной связью, так и с инвертором и со звеном постоянного тока. Блок-схемы этих приводов будут такими же, как и на рис. 37а и б, если в них вместо асинхронного двигателя АДиг поставить вентильный двигатель ВДИГ.

Вариант 5 (рис. 38). Индукторный генератор приводится во вращение двигателем постоянного тока ДПТ, питание которого осуществляется через фильтр Φ от управляемого выпрямителя УВ. Управление выпрямителем УВ и возбуждением генератора ИГ должно быть отрегулировано и синхронизировано таким образом, чтобы обеспечить требуемый закон изменения напряжения и частоты генератора.

Проанализируем подробнее перечисленные выше пять вариантов возможных схем электропривода, заостряя основное внимание на работе главных узлов, определяющих регулировочные и технико-экономические показатели привода. В первом варианте таким узлом является непосредственный преобразователь частоты. Из всего разнообразия схем преобразователей для целей регулирования тягового привода наиболее пригодным представляется трехфазно-трехфазный преобразователь частоты с естественной коммутацией тиристоров (рис. 39). Как уже упоминалось выше при рассмотрении схемы (рис. 37, а), преобразователь частоты преобразует неизменное трехфазное напряжение сети в трехфазное напряжение, регулируемое по величине и частоте.

Выходная частота преобразователя задается системой управления в виде модулирующего напряжения (прямоугольной или синусоидальной формы). Управляющие импульсы тиристоров целесообразно формировать таким образом, чтобы их можно было снимать с тиристоров той группы, ток нагрузки через которые достиг нуля, и подавать на тиристоры другой группы, формирующей полуволну тока другой полярности.

Как видно из схемы (рис. 39), каждая фаза нагрузки подключена ко всем трем фазам питающей сети через встречно-параллельно включенные тиристоры. Управляя соответствующим образом моментами открытия тиристоров, можно формировать в фазах нагрузки переменное напряжение заданной частоты. Полуволна такого напряжения будет представлять собой выпрямленное напряжение сети, величина которого определяется линейным напряжением двух фаз. Переключение тока с фазы на фазу будет происходить естественным путем в моменты равенства фазных напряжений. В интервале между моментами изменения полярности напряжения в фазах нагрузки непосредственный преобразователь частоты будет работать как обычный трехфазный выпрямитель с естественной коммутацией токов.

Таким образом, в непосредственном преобразователе частоты выпрямление переменного напряжения сети и преобразование этого выпрямленного напряжения в переменное требуемой частоты совмещено в одном устройстве, что обуславливает однократное использование энергии и высокое значение КПД преобразователя этого типа, их малые габариты и массу.

Недостатками преобразователя с непосредственной связью является: низкий коэффициент мощности со стороны питающей сети, большой процент высших гармоник в выходном напряжении, сложность системы управления и ограниченность максимального значения выходной частоты. Приемлемый гармонический состав выходного напряжения НПЧ может обеспечить только при фиксированных выходных частотах:

$$f_{\text{вых}} = f_1 / 2n + 1 = 50 / 2(0,1,2\dots) + 1 = 50; 16 \frac{2}{3}; 10; 7,5; 5,5; 4,56; 3,85; 3,35; 2,95; 2,65; 2,4; 2,2\dots \text{ Гц.}$$

Из этого ряда видно, что удовлетворительная форма выходного напряжения НПЧ может быть получена при выходных частотах не более 10 Гц. Кроме того, отсутствие в системе звена постоянного тока исключает возможность использования статических накопителей энергии, позволяющих более равномерно осуществлять загрузку сети в различное время суток. ОТС является энергоемким устройством, поэтому помимо необходимости решения задачи оптимизации процесса регулирования должны быть решены такие проблемы, как накопление энергии в специальных накопителях (напр., емкостных) во время наименьшей загрузки питающей сети другими (промышленными) потребителями с последующим использованием этой энергии в часы наибольшей загрузки (часы пик), проблема компенсации реактивной мощности сети, которая легче решается в преобразователях со звеном постоянного тока.

Таким образом, применение системы регулирования скорости индукторного генератора посредством асинхронного электропривода с непосредственным преобразователем частоты для разгона ОТС технически не целесообразно.

Анализ отечественных и зарубежных разработок в области асинхронного частотно-регулируемого тягового электропривода показывает, что наибольшее развитие получил электропривод с автономным инвертором со звеном постоянного тока

В свою очередь автономные инвертора могут быть инверторами напряжения и инверторами тока. В нашей стране и за рубежом проводились исследования асинхронного тягового привода как с инверторами напряжения, так и с инверторами тока, однако предпочтение отдано автономному инвертору напряжения.

Основные достоинства инвертора напряжения заключаются в малой установленной мощности коммутирующих конденсаторов и в стабильности выходного напряжения при изменениях нагрузок асинхронного двигателя. Однако, прежде чем перейти к характеристике вариантов автономных инверторов, проанализируем коротко функции звена постоянного тока, состоящего из выпрямителя В и фильтра Ф (рис. 37).

В обычном исполнении выпрямитель не таит в себе неизвестных явлений и на нем не имело бы смысла заострять внимание. Однако выше было указано, что в энергоемкой системе большого внимания требует вопрос улучшения коэффициента мощности со стороны питающей сети. Существует много способов компенсации реактивной мощности питающей сети, однако до настоящего времени в нашей стране вопросы повышения коэффициента мощности решены неудовлетворительно. В то же время звено постоянного тока может позволить реализовать коэффициент мощности, равный единице. В качестве

примера здесь уместно привести краткое описание технического решения, которое разработала фирма ВВС для асинхронного электровода серии Е-120. Это устройство обеспечивает высокую степень сглаживания выпрямленного тока и потребляет из питающей сети чисто синусоидальный ток, совпадающий по фазе с питающим напряжением. Так как электровод питается от однофазной сети переменного тока, устройство также выполнено в однофазном исполнении и не может быть использовано непосредственно для ОТС. Однако при соответствующей доработке схемы идея фирмы ВВС может быть реализована и в трехфазном исполнении в управляемом и неуправляемом вариантах выпрямителя.

рис. 40

Собственно преобразователь $\sqrt{\quad}$ включает в себя неуправляемый однофазный мостовой выпрямитель Д1-Д4, каждый диод которого зашунтирован встречно включенным тиристором Т1-Т4 с устройствами принудительной емкостной коммутации (узлы коммутации не показаны). Сетевой дроссель L1 служит для ограничения бросков тока в питающей сети при одновременном включении тиристоров Т1 и Т2, Т3 и Т4; индуктивность его выбрана такой величины, чтобы относительное напряжение короткого замыкания сети вместе с дросселем составляло 30 %. Фильтровый дроссель L2 и конденсатор С1 образуют резонансную отсасывающую сеть для замыкания второй гармонической составляющей (сетевого тока). Дроссель L3 и конденсатор С2 обеспечивают подавление высших гармонических составляющих тока и напряжения на входе автономного инвертора.

По принципу действия рассматриваемый преобразователь представляет собой выпрямитель с емкостным импульсным регулятором. Широтно-импульсная модуляция потребляемого тока реализуется путем включения и выключения тиристоров Т1-Т4 по заданному алгоритму.

Наличие противовключенных тиристоров Т1-Т4 позволяет осуществлять реж.ИМ рекуперативного торможения без изменения полярности напряжения в звене постоянного тока.

Исследования преобразователя, проведенные в ФРГ, позволили установить, что уровень высших гармоник сетевого тока не превышал 1% при коэффициенте мощности 0,98. Метод широтно-импульсной модуляции выпрямительного звена позволял даже обеспечить несколько опережающего (емкостного) тока из сети. За счет уменьшения действующего значения сетевого тока существенно снижаются потери напряжения в питающей сети и увеличивается КПД системы энергоснабжения.

Вторым основным элементом структурной схемы электропривода (рис. 37) является автономный инвертор И. Несмотря на большое разнообразие вариантов построения главных цепей трех-фазных тиристорных инверторов напряжения, все они строятся на основе одной и той же обобщенной структурной схемы, изображенной на рис. 41.

Трехфазный мост состоит из шести тиристорных плеч Т1-Т6. Каждое тиристорное плечо зашунтировано диодным плечом, включенным встречно (Д1-Д6). Такое включение обеспечивает двустороннюю проводимость тиристорно-диодного блока при открытом состоянии тиристоров.

Отличие схем автономных инверторов напряжения заключается главным образом в способах выключения тиристоров и, следовательно, в построении узлов искусственной емкостной коммутации. На рис. 42-47 показаны варианты схем автономных инверторов напряжения, в разное время исследованные теоретически и экспериментально на опытных образцах электроподвижного состава с асинхронным частотно-регулируемым электроприводом мощностью 300 и 1200 кВт. В качестве иллюстрации сказанного на рис. 48 приведена осциллограмма электромагнитных процессов в тяговом электровозном частотно-регулируемом асинхронном электроприводе со звеном постоянного

тока в виде управляемого выпрямителя и индуктивно-емкостного фильтра.

Напряжение на входе инвертора U_d регулируется амплитудным способом с помощью управляемого выпрямителя, а на автономный инвертор напряжения возложена только функция регулирования частоты тока статора f_1 и поддержание постоянства частоты тока ротора f_2 .

Электропривод имел следующие номинальные параметры:

-мощность, кВт	1200
-напряжение на выходе звена постоянного тока (на входе инвертора) U_a , В	1670
-выпрямленный ток I_d , А	780
-частота статора двигателя f_1 , Гц	94

На осциллограмме рис. 48 показаны фазное напряжение двигателя U_{ϕ} , ток фазы i_{ϕ} , ток на входе инвертора i . Показана модуляция фазного тока с частотой, равной разности частот выходного напряжения выпрямителя (100 Гц) и статора электродвигателя (92 Гц).

Система управления электровоза обеспечивала параллельную работу 8-ми электродвигателей (электровоз имел 8 осей) с помощью одного контроллера машиниста, а также работу нескольких электровозов по системе многих единиц. Последнее подчеркивается не случайно, так как в электроприводе ОТС необходимо будет решить аналогичную задачу обеспечения параллельной работы огромного количества каналов подвода энергии к основному электродвигателю через параллельные ветви статорной обмотки.

Если из схем автономных инверторов напряжения удалить элементы (тиристоры и диоды) обобщенной схемы рис. 41, то останутся элементы устройства коммутации (гашения) тиристоров. Как видно из рисунков, схемы узлов коммутации различны, но у всех у них один и тот же принцип действия. Гашение тиристоров Т1-Т6 осуществляется путем вытеснения из них тока встречно направленным током разряда коммутирующего конденсатора и последующего прикладывания к ним обратного напряжения. Легко заметить, что во всех схемах инверторов рис. 42÷46 коммутирующий конденсатор C_k является единственным на весь инвертор и используется для гашения всех тиристоров Т1-Т6. Такие инвертора называются инверторами с общим для всех фаз узлом коммутации.

В принципе любой из рассматриваемых вариантов инверторов можно выполнять с отдельными узлами коммутации на каждую фазу (фазная коммутация) или же с тремя узлами коммутации, каждый из которых является общим для двух фаз (междуфазовая коммутация). Однако несмотря на шестикратную (по сравнению с током статора) частоту тока в коммутирующем узле, общем для всех фаз, габариты коммутирующих конденсатора и дросселя в инверторах с общим узлом коммутации оказываются меньше, чем суммарные габариты коммутирующих элементов в автономных инверторах с фазовой и междуфазовой коммутациями.

На рис. 47 показана схема автономного инвертора, у которого совмещены функции регулирования напряжения и частоты. Регулирование напряжения осуществляется методами широтно-импульсной модуляции, поэтому для каждой фазы инвертора имеется свой узел принудительного гашения тиристоров. В инверторах (рис. 42÷46) регулирование напряжения осуществляется так называемым амплитудным способом с помощью управляемого выпрямителя.

Все приведенные инверторы, включая и инвертор (рис. 47) при максимальном напряжении, имеют прямоугольно-ступенчатую форму фазного напряжения и прямоугольную форму линейного напряжения (рис. 49). На этом же рисунке показан алгоритм переключения главных тиристоров Т1-Т6, обеспечивающий заданную форму выходного напряжения инвертора.

Форма фазных токов асинхронной машины при питании ее напряжением прямоугольно-ступенчатой формы показана на рис. 50. Заштрихованные участки кривых представляют собой токи фаз электродвигателя, замыкающиеся через диоды обратного моста Д1-Д6, т.е. реактивные токи двигателя. Чем шире заштрихованная поверхность, тем ниже коэффициент мощности машины, тем меньше загрузка главных тиристоров и больше загрузка диодов обратного моста. Эта особенность работы автономного инвертора напряжения подчеркнута здесь не случайно и будет использована при оценке установленной мощности тиристоров и диодов. Исходя из необходимости оценки установленной мощности вентиля возникает необходимость рассмотрения процессов коммутации главных тиристоров во всех приведенных выше схемах инверторов. Это будет сделано упрощенно на примере гашения любого общего для всех схем тиристора, например Т1.

На рис. 42 показана схема автономного инвертора напряжения без устройства ограничения напряжения на коммутирующем конденсаторе С_к, реализованная на натурном стенде с асинхронным частотно-регулируемым электроприводом мощностью 1200 кВт и на единственных в нашей стране образцах электроподвижного состава электропоезда ЭР9А и электровозе ВЛ80А.

Для гашения тиристора Т1 необходимо, чтобы коммутирующий конденсатор был предварительно заряжен до требуемого напряжения с полярностью, показанной на рис. 42. Процесс коммутации начинается с открытия тиристорov Т7 и Т13. Ток разряда конденсатора (ток коммутации) вытесняет ток из тиристора Т1. В момент достижения током коммутации значения тока фазы тиристор Т1 обесточивается и дальнейшее увеличение тока коммутации происходит через диод обратного моста Д1 и резистор R. Падение напряжения на диоде Д1 и резисторе R является обратным для тиристора Т1 и способствует восстановлению его запирающих свойств. Ток коммутации нарастает до амплитудного значения, а затем снижается снова до значения тока фазы нагрузки. С этого момента диод Д1 обесточивается, а ток коммутации замыкается через источник питания напряжения инвертора U_н и нагрузку (асинхронный электродвигатель), зашунтированный диодом Д4. Коммутирующий конденсатор перезаряжается до напряжения обратной полярности, величина которого ориентировочно определяется выражением:

$$U_{ск} = |U_{и}| + |\rho I_{н}| ,$$

где ρ - волновое сопротивление контура коммутации, а
I_н - ток фазы электродвигателя в момент коммутации.

В зависимости от параметров контура коммутации и величины тока нагрузки двигателя напряжение на коммутирующем конденсаторе может значительно превышать входное напряжение инвертора U_и. С одной стороны это хорошо, с точки зрения повышения коммутационной способности автономного инвертора, а с другой стороны увеличение напряжения U_{ск} требует увеличения установленной мощности тиристорov и коммутирующего конденсатора. Рассмотренный инвертор по сравнению с другими является самым простым, так как не имеет дополнительных устройств ограничения напряжения на коммутирующей емкости и может быть использован в мощных электроприводах.

Автономный инвертор напряжения (рис. 43) отличается от предыдущего тем, что у него максимальное значение напряжения на коммутирующем конденсаторе ограничено величиной напряжения зарядного источника. В случае превышения напряжением $U_{ск}$ значения U_z энергия коммутирующего конденсатора отводится в зарядный источник через дополнительные диоды Д7-Д10 и резисторы R1, R2. В этой схеме инвертора величина напряжения зарядного источника должна выбираться, исходя из условия надежного запираания тиристоров при максимальных токах нагрузки.

В схеме автономного инвертора напряжения (рис. 44) отвод избыточной энергии из узла коммутации осуществляется путем подключения коммутационных дросселей на последнем этапе коммутации через дополнительные диоды Д7 и Д10 к источнику питающего напряжения инвертора $U_{и}$.

Принципиальная схема автономного инвертора (рис. 45) получена из схемы (рис. 42), если групповые коммутирующие тиристоры Т13-Т14 заменить двумя конденсаторами фильтра Сф. Узел коммутации в этом случае имеет другие параметры элементов, так как на разных интервалах процесса коммутации в контур коммутации включаются то встречно, то согласно напряжения на конденсаторах Сф. Оба конденсатора Сф одинаковы по величине, а напряжение на каждом из них равно половине входного напряжения инвертора $U_{и}$. Максимальное значение напряжения на коммутирующем конденсаторе в данном случае определяется не полным напряжением $U_{и}$, а его половиной.

В инверторе (рис. 46) по-новому использованы известные решения, способствующие ослаблению эффекта накопления энергии в коммутирующем конденсаторе, а именно: входной фильтр выполнен со средней точкой, а дополнительный (зарядный) источник, также имеющий среднюю точку, своими половинами включен непосредственно в цепь контура коммутации. Анализ электромагнитных процессов в рассматриваемой схеме показал, что она выгодно отличается от приведенных выше схем автономных инверторов вследствие очень низкого значения напряжения и автоматической стабилизации процесса коммутации.

На рис. 47 показан автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией тока нагрузки по синусоидальному закону. Подобные схемы инверторов реализованы на электроподвижном составе за рубежом и в нашей стране в электроприводе автомобилей с асинхронными тяговыми двигателями. В случае применения этой схемы автономного инвертора целесообразно обратиться к опыту ФРГ, где инвертор с широтно-импульсной модуляцией используется в сочетании с импульсным выпрямителем с целью компенсации реактивной мощности питающей сети.

В настоящем разделе не ставилась задача подробного исследования различных вариантов схем автономных инверторов напряжения с целью выбора конкретной схемы. Рассмотренные схемы-это практически все те схемы, которые были исследованы (теоретически и экспериментально) в нашей стране в мощном тяговом электроприводе с асинхронными двигателями и работоспособность которых не вызывает сомнений. С достаточной уверенностью можно предположить, что для электропривода ОТС окажется пригодной ^{одна} из рассмотренных схем автономных инверторов, либо схема, подобная этим. Тем не менее следует дать краткий анализ и возможным вариантам приводов с синхронным двигателем и машиной постоянного тока.

На рис. 51, 52 представлены схемы вентильных электроприводов со звеном постоянного тока и преобразователем с непосредственной связью. Следует отметить, что имеется определенная аналогия между вентильным двигателем и коллекторным электродвигателем постоянного тока. В коллекторном

двигателе постоянного тока происходит последовательное переключение ветвей обмоток с помощью коллектора и щеток, а в вентильном двигателе-переключение фаз обмоток с помощью вентильного преобразователя. Для обеспечения коммутации тока в цепях вентильного двигателя необходима реактивная мощность. Такой мощностью обладает сама электрическая машина. В вентильном электроприводе со звеном постоянного тока (рис. 51) невозможна коммутация тиристоров преобразователя с помощью машины во время пуска, когда ЭДС машины равна нулю. В этом случае требуется искусственная коммутация тиристоров. Большой интерес представляет схема рис. 52, когда во всех режимах работы привода осуществляется естественная коммутация тиристоров преобразователя. В процессе пуска вентильного двигателя коммутация тока в фазах машины производится за счет напряжения питающей сети без изменения алгоритма переключения вентилей преобразователя.

При работающей вентильной машине коммутация токов в фазах машины и в группах тиристоров преобразователя осуществляется за счет напряжения машины.

В процессе разработки тягового электропривода электроподвижного состава железнодорожного транспорта (электровоз, тепловоз, моторвагонный подвижной состав) в нашей стране до постоянного времени не выработано единого мнения относительно того, каким должен быть перспективный тяговый привод: с асинхронными тяговыми двигателями или же с вентильными. За рубежом предпочтение отдается явно асинхронному частотно-регулируемому электроприводу. тем не менее, наиболее распространен электроподвижной состав с электроприводом на базе двигателей постоянного тока

Структурная схема такого электропривода применительно к ОТС (рис. 38) уже рассматривалась выше. Электропривод позволяет осуществить любой закон регулирования скорости путем регулирования выходного напряжения выпрямителя и возбуждения двигателя постоянного тока. Наличие звена постоянного тока позволяет применить статические накопители энергии и устройства компенсации реактивной мощности питающей сети. Однако асинхронный двигатель примерно в 3 раза дешевле и в 2 раза легче двигателя постоянного тока, имеет высокий КПД, практически не нуждается в обслуживании, меньше требует расхода цветных металлов.

Таким образом, приведенный выше анализ различных вариантов приводов индукторного генератора показывает очевидное преимущество электропривода переменного тока (асинхронного и вентильного). В свою очередь для рассматриваемой задачи наиболее пригодным представляется асинхронный электропривод с автономным инвертором напряжения со звеном постоянного тока, с компенсатором реактивной мощности первичной сети и статическим накопителем энергии.

Расчет установленной мощности вентиля автономного инвертора напряжения.

Для расчета установленной мощности преобразователя частоты необходимо записать основные соотношения электромагнитных процессов в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе электромеханического преобразователя.

1. Активная мощность статора

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 \cdot K_i \cdot K_u ,$$

где U_1 , I_1 - действующие значения первой гармонической фазных напряжения и тока;
 K_i , K_u - коэффициенты искажения формы фазных тока и напряжения, равные отношению действующих значений 1-ых гармоник к действующему значению всей кривой (K_i и $K_u \leq 1$);

φ_1 - угол сдвига по фазе между первыми гармоническими фазных напряжения и тока.

Произведение $\cos \varphi_1 \cdot K_i \cdot K_u = K_M$

представляют собой коэффициент мощности асинхронного двигателя

2. Активная мощность на входе преобразователя частоты

$$P_d = I_d \cdot U_d ,$$

где I_d и U_d - средние значения тока и напряжения на выходе звена постоянного тока (после фильтра) или на входе автономного инвертора.

3. Так как расчет установленной мощности преобразователя частоты будет производиться для номинального режима работы электропривода, то, независимо от способа регулирования напряжения (амплитудный способ путем регулирования выходного напряжения управляемого выпрямителя или метод широтно-импульсной модуляции при неизменном выходном напряжении выпрямителя) между средним значением напряжения на входе автономного инвертора U_d и действующим значением первой гармонической фазного напряжения нагрузки прямоугольно-ступенчатой формы будет существовать следующая зависимость:

$$U_d = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot U_1 = 2,22U_1 \quad (3)$$

4. При допущении КПД автономного инвертора $\eta = 1$

$P_1 = P_d$. тогда

$$3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot K_i \cdot K_u = I_d \cdot 2,22U_1 , \text{ откуда}$$

$$I_d = 1,35 I_1 \cos \varphi_1 K_i K_u \quad (4)$$

5. Для прямоугольно-ступенчатой формы кривой фазного напряжения коэффициент искажения формы:

$$K_{fi} = \frac{3}{\pi} = 0,955 \quad (5)$$

Значение K_u не зависит от параметров асинхронного двигателя, что является одной из особенностей питания двигателя от автономного инвертора напряжения.

6. Кривая фазного тока i_1 (i_A , i_B и i_C рис. 50) имеет характерную форму, содержащую помимо первой, также нечетные и не кратные трем высшие гармонические составляющие. Коэффициент искажения формы фазного тока K_i зависит от параметров двигателя. Как показали исследования асинхронного электропривода опытных образцов отечественного электроподвижного состава (электровоз и электропоезд)

значение коэффициента K_i равнялось 0,985. Такое же значение K_i можно принять и для рассматриваемого привода индукторного генератора.

7. Выражение (4) удобнее записать так:

$$I_1 = \frac{0,741 \cdot I_d}{\cos \varphi_1 \cdot K_i \cdot K_u} \quad (6)$$

или через амплитудное значение

$$I_{1A} = \frac{1,048 \cdot I_d}{\cos \varphi_1 \cdot K_i \cdot K_u} \quad (7)$$

8. Среднее значение тока тиристорного плеча инвертора

$$I_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\alpha_n} i_n(\omega t) d\omega t \quad (8)$$

где i_n - мгновенное значение тока плеча, а α_n - угол проводимости плеча

9. Расчетное значение тока плеча преобразователя

$$I_p = \frac{I_{cp}}{K_f},$$

где K_f - коэффициент формы кривой тока, определяемый по справочным данным для соответствующих типов тиристоров. Анализ показывает, что зависимости коэффициента K_f в функции угла проводимости практически одинакова для тиристоров различных типов. На рис. 53 приведены типичные зависимости коэффициента K_f в функции угла проводимости α_n для прямоугольной и синусоидальной формы тока. Из приведенных зависимостей следует, что допустимый средний ток тиристоров снижается по мере

уменьшения угла α_n . В таблице 14 приведены значения I_{cp} , K_f и I расч. для токов различной формы, которые характерны для преобразователей рассматриваемых типов.

Рассчитаем установленную мощность вентиля автономного инвертора напряжения (рис. 42), не имеющего устройств ограничения напряжения на коммутирующем конденсаторе. Другие рассмотренные выше типы инверторов будут иметь несколько меньшую установленную мощность инверторов и диодов. Для расчета необходимо знать величину $\cos \varphi_1$, для того, чтобы определить угол проводимости тиристоров и диодов α_n . Как следует из табл. , приводные двигатели преобразователей серии ППЧВ и ВПЧ с номинальной частотой выходного напряжения 8 кГц и 10 кГц имеют значения $\cos \varphi_1 = 0,9$. Следует подчеркнуть одну из особенностей работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода: при пуске электропривода в соответствии с законом М.П. Костенко при низких частотах тока статора на электромагнитные процессы большее влияние оказывают омические сопротивления обмотки, чем индуктивные и коэффициент мощности асинхронной машины будет выше, чем в номинальном режиме работы. Это видно из схемы замещения асинхронной машины (рис. 54). Индуктивные сопротивления статора αX_1 и ротора αX_2 зависят от частоты тока статора и при пуске очень малы. Значение $\alpha = f_1/f_{1H}$ (относительная частота тока статора) в процессе пуска увеличивается примерно в 50 раз при частоте $f_{1H} = 50$ Гц, а следовательно и увеличиваются произведения αX_1 и αX_2 . Омическое сопротивление статорной обмотки Z_1 вообще не зависит от частоты, а омическое сопротивление ротора в момент пуска хотя и имеет минимальное значение и возрастает с увеличением частоты f_1 , влияние его мало по сравнению с r_1 . Параметр $\beta = f_2/f_{1H}$ называют параметром абсолютного скольжения, который в процессе пуска либо поддерживается неизменным, либо регулируется по требуемому закону. В момент пуска $\alpha = \beta$.

Из изложенного следует, что коэффициент мощности асинхронного двигателя в процессе пуска не может быть ниже номинального значения, поэтому номинальное значение $\cos \varphi_1 = 0,9$ и будет определять максимальное значение реактивной мощности, замыкающейся через обратные диоды автономного инвертора напряжения.

Для главных тиристоров Т1-Т6 при $\varphi_1 = \arccos 0,9 = 26^\circ$ угол проводимости $\alpha_n = 180 - 26 = 154$ эр. эл.

Тогда среднее значение тока, протекающего через главные тиристоры

$$I_{cp.r} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{154^\circ} I_{1A} \cdot \sin \vartheta \cdot d\vartheta = \frac{I_{1A}}{2\pi} \left| -\cos \vartheta \right|_0^{154^\circ} = \\ = \frac{I_{1A}}{2\pi} (0,898 + 1) = 0,302 I_{1A}$$

Из справочника находим, что коэффициент формы тока $K_f = 0,9$. Расчетное значение тока для главных тиристоров

$$I_{p.r} = \frac{0,302}{0,90} I_{1A} = 0,335 I_{1A}.$$

Для диодов обратного моста $\alpha_n = 26$ эл. эр., а $K_f = 0,47$

Тогда
$$I_{cp.o} = \frac{I_{1A}}{2\pi} \int_0^{26^\circ} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{I_{1A}}{2\pi} \left| -\cos \vartheta \right|_0^{26^\circ} = \\ = \frac{I_{1A}}{2\pi} (-0,898 + 1) = 0,016 I_{1A}.$$

№№ п/п	Форма токов	I_{cp}	K_{ϕ}	$I_{расч}$
1		$0,5I_d$	1,0	$0,5I_d$
2		$0,333I_d$	0,9	$0,37I_d$
3		$0,166I_d$	0,71	$0,233I_d$
4		$0,318I_d$	0,95	$0,335I_d$
5		$0,29I_d$	0,9	$0,322I_d$
6		$0,027I_d$	0,5	$0,054I_d$
7		$0,05I_d^*$	0,4	$0,125I_d^*$
8		$0,15I_d^*$	0,7	$0,214I_d^*$
9		$0,333I_d$	0,9	$0,37$

Расчетное значение тока для обратных диодов

$$I_{p.o} = \frac{0,016}{0,47} \cdot I_{1A} = 0,034 I_{1A} .$$

Используя выражение (7), выразим расчетное значение токов через значение тока на выходе звена постоянного тока (на входе автономного инвертора) I_d :

$$I_{p.r} = 0,335 \cdot \frac{1,048 \cdot I_d}{0,9 \cdot 0,985 \cdot 0,955} = 0,415 I_d .$$

$$I_{p.o} = 0,034 \cdot \frac{1,048 \cdot I_d}{0,9 \cdot 0,985 \cdot 0,955} = 0,0421 I_d .$$

Чтобы определить установленную мощность главных тиристорov и диодов обратного моста, необходимо знать расчетное напряжение, прикладываемое к этим вентилям. Анализ электромагнитных процессов в автономных инверторах показывает, что для основных силовых вентильных плеч в качестве расчетного можно принять номинальное напряжение на входе инвертора U , увеличенное в 1,2 раза. Увеличение обусловлено падением напряжения на резисторе R_0 (примерно 10% от U_{dH}) и пульсацией входного напряжения с амплитудой около $0,1U_{dH}$ т.е.

$$U_{p.r} = U_{p.o} = 1,2 U_{dH} .$$

Тогда установленные мощности 6-ти плеч главных тиристорov и такого же количества плеч обратных диодов будут соответственно равны:

$$P_{уст.r} = 6 \cdot 0,415 \cdot I_d \cdot 1,2 \cdot U_{dH} = 2,988 P_{dH} .$$

$$P_{уст.o} = 6 \cdot 0,0421 \cdot I_d \cdot 1,2 U_{dH} = 0,303 P_{dH} .$$

Последние две величины соответствуют существующей практике: установленная мощность диодов обратного моста в асинхронных тяговых приводах составляет примерно 10% от установленной мощности главных тиристорov.

Таким образом, путем несложных преобразований известных соотношений электромагнитных процессов в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе и используя лишь достоверные сведения о двигателе ($\cos \varphi_1$) удалось выразить установленную мощность основных вентилях через номинальную активную мощность на входе автономного инвертора, т.е. получить решение в общем виде.

Для тиристорov узла коммутации такое решение не возможно без привязки к конкретным параметрам, основными из которых является время восстановления замирающих свойств главных тиристорov.

На данном этапе не имеет смысла прогнозировать параметры тиристорov.

Более правильно будет использовать имеющийся опыт создания тяговых асинхронных электроприводов и оценить установленную мощность вентиля узла коммутации по отношению ее к мощности главных тиристорov.

Так, например, для электропривода мощностью 1200 кВт (осциллограмма рис. 48) установленная мощность главных вентиля и вентиля узла искусственной коммутации тиристорov равнялась соответственно $5,78 P_{дн}$ и $5,1 P_{дн}$.

Примерно такой же ($5,55 P_{дн}$) была установленная мощность и вентиля управляемого выпрямителя.

Таким образом, для электропривода ОТС с индукторными генераторами и асинхронными приводными двигателями суммарную установленную мощность силовых полупроводниковых элементов можно считать равной утроенной мощности главных тиристорov и диодов обратного моста

$$P_{уст.} = 3 (2,988 + 0,303) P_{дн} = 9,8 P_{дн} .$$

Полученное значение позволяет оценить установленную мощность силовых полупроводниковых элементов в кВт и даже указать количество этих элементов на примере конкретного тиристора.

В начале анализа преобразовательных устройств системы электропитания ОТС была рассчитана полная мощность основного электродвигателя

$$S = 12,4 \cdot 10^9 \text{ Вт} .$$

Эта мощность определяет суммарную полную мощность всех индукторных генераторов. Суммарная мощность всех приводных асинхронных двигателей генераторов будет определяться не полной, а активной мощностью, потребляемой основным двигателем от всех генераторов. Эта мощность будет равна (например, для $\cos \varphi_1 = 0,35$ и $0,7$)

$$P_1 = S \cdot \cos \varphi_1 = 12,4 \cdot 10^9 \cdot 0,35 = 4,34 \cdot 10^9 \text{ Вт} .$$

$$P_2 = 12,4 \cdot 10^9 \cdot 0,7 = 8,68 \cdot 10^9 \text{ Вт} .$$

Для приводных асинхронных двигателей эта мощность будет являться полезной мощностью P_2 . Если принять КПД двигателей и инверторов за единицу, то можно считать, что $P_1 = P_2$.

Тогда установленная мощность вентиля статических преобразователей для двух значений $\cos \varphi$ основного двигателя будет равна:

$$P_{уст.} = 9,8 \cdot 4,34 \cdot 10^9 = 42,532 \cdot 10^9 \text{ Вт} .$$

$$P_{уст.} = 9,8 \cdot 8,68 \cdot 10^9 = 85,064 \cdot 10^9 \text{ Вт} .$$

Теперь представим себе, что все статические преобразователи спроектированы на тиристорах 10 класса с номинальным током 1000 А. Для обеспечения найденных выше значений установленной мощности потребуется следующее количество тиристорov:

$$n = \frac{42,532 \cdot 10^9}{1000 \cdot 1000} \cdot 2 = 85 \cdot 10^3 \text{ штук} .$$

Цифра 2 здесь означает принятый 2-кратный запас. Фактически цифра 85×10^3 значительно занижена. Она дает только ориентировочное представление об установках, которые спроектированы аналогично известным преобразовательным устройствам. В ходе работы появятся многочисленные варианты схем с целью оптимизации построения системы электропитания. Например, использование сравнительно маломощных электромеханических преобразователей-мероприятие вынужденное, так как отсутствуют в настоящее время мощные высокочастотные преобразователи. Известно, что с увеличением мощности электрических машин их удельные показатели улучшаются. Этого, к сожалению нельзя сказать о полупроводниковых преобразователях. Увеличение мощности отдельного полупроводникового элемента требует применения громоздких охладителей, в результате чего ухудшаются удельные показатели (кВт/кг, объем). Поэтому необходимо провести тщательный анализ многих вариантов преобразовательных устройств. Может оказаться так, что экономичнее будет система электропитания каждого электромеханического высокочастотного преобразователя от отдельного полупроводникового (тиристорного или транзисторного) преобразователя частоты соответствующей мощности.

Выше рассмотрены наиболее общие вопросы электропитания ОТС и совсем не анализировались системы первичного электроснабжения: типы и мощности электростанций, трансформаторных тяговых подстанций, компенсирующие и фильтровые устройства. На данном этапе перечисленные устройства не могут быть оценены с полной объективностью без специального детального анализа конкретных технических решений путем математического и физического моделирования.

5. Перспективные типы накопителей для систем разгона

Для функционирования ОТС необходимо будет создать крупную энергосистему, содержащую, кроме традиционно используемых в энергетике элементов, ряд дополнительных устройств, разработанных исходя из специфики работы ОТС.

Среди этих устройств огромная роль будет принадлежать накопителям энергии различного вида, которые будут работать в системе электромеханического преобразования кинетической энергии ротора ОТС, в циклах разгона и торможения. Прежде всего найдут применение мощные емкостные, индуктивные и электромашинные накопители. Например, в звено постоянного тока тиристорных преобразователей, питающих ОТС (раздел) должны быть включены мощные емкостные накопители для приема и возврата части кинетической энергии ротора ОТС и др. целей.

Подобные схемы не используются в настоящее время в крупной энергетике из-за низких технико-экономических показателей емкостных накопителей, если их комплектовать из конденсаторов современного технического уровня.

Нам представляется, что крупные достижения в создании мощных накопителей для электродинамических ускорителей и других импульсных установок могут быть с успехом использованы и при создании накопителей для ОТС.

Ниже кратко описаны упомянутые достижения и перспективы в этой области, причем более подробно рассмотрены емкостные накопители.

Из всех известных видов накопителей энергии для питания электродинамических ускорителей предпочтение отдается индуктивным, емкостным и электромашинным накопителям.

Индуктивные накопители

Запасаемая энергия индуктивного накопителя пропорциональна его индуктивности и квадрату тока и может достигать сотен мегаджоулей. В перспективе ожидается ее увеличение на несколько порядков, что повлечет улучшение их удельных технических и стоимостных характеристик.

Индуктивные накопители, работающие при нормальной температуре, не могут долго хранить энергию из-за относительно малой постоянной времени, составляющей несколько миллисекунд для небольших и несколько секунд для крупных накопителей. Следовательно, у индуктивных накопителей продолжительность хранения энергии по крайней мере на два порядка меньше, чем у емкостных накопителей.

По этим причинам продолжительность запитки индуктивного накопителя по экономическим соображениям не может превышать величину постоянной времени, что требует значительной мощности первичного источника.

Ввиду необходимости быстрого разрыва индуктивной цепи при токах в единицы-десятки мегаампер, значительные трудности возникают при создании соответствующей коммутационной аппаратуры. Перенапряжения, вызванные разрывом цепи накопителя должны учитываться при выборе электрической изоляции. Из-за сильных магнитных полей и электродинамического взаимодействия проводников, обтекаемых сильными токами, требуется создание высокопрочных конструкций, получение коэффициента передачи энергии более 25% связано со значительными усложнениями схемы накопителя.

Использование криогенного охлаждения обмоток позволяет увеличить постоянную времени индуктивного накопителя до десятков секунд и, соответственно, улучшить его параметры. Сверхпроводниковые индуктивные накопители способны хранить энергию практически неограниченное время без подпитки. Однако при чрезмерном увеличении плотности тока может наступить потеря сверхпроводящего состояния накопителя. Аналогичное явление может произойти при чрезмерном увеличении магнитного поля, в котором находится сверхпроводниковая обмотка, а также при чрезмерно быстром изменении магнитного потока в процессе запитки накопителя или при отдаче энергии. Это обстоятельство накладывает определенные ограничения на использование сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии в установках, требующих высоких значений тока, магнитной индукции, короткого импульса.

Электромашинные накопители

Электромашинные накопители (униполярные и синхронные генераторы, компульсаторы) характеризуются большим сроком службы, высокой надежностью, невысокой удельной стоимостью, высокой эффективностью передачи энергии в нагрузку. Из всех рассматриваемых типов накопителей энергии они являются наиболее энергоемкими, способными хранить запасенную энергию долгое время. При необходимости количество запасаемой энергии может быть увеличено путем установки на валу машины дополнительного маховика. При этом разгон машины для накопления энергии может производиться двигателем относительно небольшой мощности.

Разработку униполярных генераторов ведет Центр электромеханики университета штата Техас (США). К настоящему времени для испытаний электродинамических ускорителей в лаборатории Центра создан блок из шести генераторов, каждый из которых запасает по 10 МДж энергии. Удельная энергия генератора 1,25 кДж/кг. Для мобильных рельсовых электромагнитных ускорителей изготовлен униполярный генератор с₃ запасаемой энергией 6,2 МДж. Его удельные параметры 4 кДж/кг и 17 МДж/м

По мнению американских специалистов, униполярные генераторы могут запасать сотни, а в перспективе и тысячи мегаджоулей энергии и в зависимости от конструкции и назначения работать в режиме коротких (миллисекунды) и длинных (секунды) импульсов. Прошел испытания сверхпроводниковый ударный униполярный генератор с запасаемой энергией 3,25 МДж. Перспективными считаются также униполярные генераторы с самовозбуждением, позволяющие получить удельную энергию на порядок выше по сравнению с используемыми в настоящее время.

Реализация возможностей униполярных генераторов связана, в основном, с решением сложной проблемы токосъема, которой заняты многие фирмы и научные учреждения ведущих капиталистических стран.

Синхронные генераторы объединяют возможности получения высокого напряжения (до нескольких десятков киловольт) с простотой токосъема. Однако значительная индуктивность обмоток синхронных генераторов энергетического назначения ограничивает их использование в качестве источников мощных импульсов энергии короткой продолжительности.

В тех системах, где продолжительность импульса составляет единицы и десятки секунд, синхронные генераторы способны отдавать в нагрузку сотни мегаватт мощности и гигаджоули энергии. Реализация такой возможности связана с созданием мощных выпрямительных устройств, стоимость которых может заметно превышать стоимость самого генератора, а также надежной коммутационной аппаратуры многократного использования.

Сверхпроводниковый синхронный генератор мощностью 20 МВт имеет удельное значение этого параметра 26 кВт/кг. Предполагается создание еще более мощных сверхпроводниковых синхронных генераторов кратковременного режима работы с таким же значением удельной мощности.

Емкостные накопители

Достоинством емкостных накопителей энергии по сравнению с другими видами накопителей является простота, удобство компоновки, отсутствие необходимости в сложных и дорогих коммутационных аппаратах, возможность создания модульных конструкций, относительно малые потери и токи утечки.

Однако емкостным накопителям присущи и существенные недостатки: они имеют значительную массу и габариты и по значению удельной энергии занимают в настоящее время худшее место среди названных выше типов накопителей. Кроме того, увеличение энергоемкости накопителя путем увеличения количества отдельных конденсаторов ведет к ухудшению удельных показателей.

Большое количество элементов в емкостном накопителе снижает его эксплуатационную надежность. На работу емкостных накопителей оказывают заметное влияние собственная индуктивность конденсаторов, а также индуктивность и омические сопротивления нагрузки.

Традиционной областью применения емкостных накопителей являются высоковольтные потребители, поглощающие до 25 МДж (а перспективе до 100 МДж) энергии в коротком импульсе при сохранении примерного постоянства напряжения на выходе. Длительное время они считались малопригодными для питания устройств, нуждающихся в сотнях мегаджоулей энергии в импульсе длительностью в несколько миллисекунд и более. Но в настоящее время положение меняется. Создаются конденсаторы с диэлектрическим слоем на базе пленок с высокой диэлектрической проницаемостью, позволяющие получать удельную энергию 0,44 кДж/кг, а в перспективе - до 4,4 кДж/кг. Еще большую удельную энергию (7 кДж/кг) имеют разрабатываемые конденсаторы с двойным электрическим слоем. По мере решения многих технологических проблем их удельная энергия, как ожидают, будет увеличена до 10 кДж/кг. Таким образом емкостные накопители получают определенную перспективу как источники питания электродинамических ускорителей и других импульсных установок.

Остановимся более подробно на описании конденсаторов с двойным электрическим слоем.

Новые конденсаторы, в отличие от обычных, не содержат диэлектрика, их емкость обеспечивается так называемым двойным электрическим слоем. Известно, что на границе раздела двух сред, жидкого электролита и твердого тела, формируется барьерный слой, способный накапливать заряд, который имеет толщину "d", в общем случае, порядка нескольких десятков ангстрем.

С другой стороны известно, что геометрическая площадь любой плоской пластины всегда меньше, чем физическая площадь поверхности "A". Такие материалы, как например, угольный порошок, обладают физической поверхностью, составляющей несколько сотен квадратных метров на грамм соответствующего материала. Теоретически, если бы можно было использовать всю эту поверхность, то это позволило бы достичь величины $A/d > 10^{12}$, что соответствовало бы емкости одна фарада на один квадратный сантиметр геометрической (планарной) поверхности. Работы в этом направлении ведутся, достигнутые результаты и перспективы представлены в таблице по данным Института космических исследований в г. Осборне (США):

Параметры	Достигнутые результаты	Перспективы
1 плотность энергии кДж/кг	7	>10
МДж/м ³	12	>15
2 количество циклов	не ограничено	
3 напряжение, кВ	1	>1
4 плотность тока А/см ²	1	>10

Основным направлением работ в использовании электрического двойного слоя для создания энергоемких конденсаторов является разработка эффективного метода смачивания электролитом пористых поверхностей электродов.

Только таким путем можно осуществить необходимый распределенный по большой поверхности электрический контакт. Используя спаренные элементы, можно получить конденсаторы с высокими удельными характеристиками, способными накапливать заряд более, чем один кулон на один квадратный сантиметр планарной поверхности.

Сборка таких элементарных ячеек конденсаторов (рис.55,56) в батареи позволяет получить необходимые напряжения и емкость.

В США в институте космических источников энергии (SPI) были изготовлены батареи конденсаторов на несколько килоджоулей и на различные уровни напряжения, ведутся исследования по снижению общего внутреннего сопротивления, которое ограничивает токи разряда.

Фирма "Мацусита" (Япония) выпускает конденсаторы с двойным электрическим слоем 2-х типов: "F" с электродами содержащими угольные нити с удельной поверхностью 2500 м²/г, и типа "A" с электродами из угольного порошка, удельная поверхность в этом случае составляет 800-1500 м²/г.

Большое внимание уделяется применению для электродов конденсаторов с двойным электрическим слоем волокнистых материалов.

Специалисты фирмы "Мацусита" считают, что использование подобных материалов в электродах повышает удельную емкость, ее стабильность, уменьшает внутреннее сопротивление.

Помимо конденсаторов с двойным электрическим слоем, использующих жидкий электролит, фирмами Франции, ФРГ, Японии ведутся разработки так называемых суперконденсаторов с двойным электрическим слоем и твердым электролитом. Конденсаторы этого типа обладают высокой плотностью запасаемой энергии (до 10 Дж/см^3).

Конденсатор фирмы "Электроисите" (Франция) [18] содержит электроды, представляющие смесь из активированного угля с удельной поверхностью $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ и электролита. Достоинствами этого конденсатора являются: высокое рабочее напряжение ячейки (более 3В), малый ток утечки, высокая рабочая температура, удельный заряд в 5 раз больше, чем у конденсаторов с жидким электролитом, высокая механическая прочность и долговечность (более 10 лет) и низкая стоимость.

Удельная емкость конденсаторов Gold capacitor фирмы "Мацусита" около $2-3 \text{ Ф/см}^3$. Они выпускаются с емкостями 0,047-100 Ф при номинальном напряжении 1,6В. Ток утечки при этом $< 1 \text{ мА}$, диапазон рабочих температур от -25 град. до $+70$ град С. Конденсаторы с емкостью 10 Ф и рабочим напряжением 1,6 В имеют форму цилиндров с диаметром 13 мм и высотой 37 мм.

В конденсаторах Super capacitor фирмы "Ниппон дэнки" (NEC) емкость от 1 до 0,047 Ф, номинальное напряжение 5-10 В, эквивалентное внутреннее сопротивление при 1Ф, 5В составляет 5 Ом (рис.57).

Анализ информационных и патентных материалов за 1984-1987гг. показал, что зарубежные фирмы стран Японии, США, Франции, ФРГ проявляют большой интерес к совершенствованию технологии конденсаторов с двойным электрическим слоем, сфера использования которых широка и охватывает области от применения в качестве источников питания сверхминиатюрной аппаратуры до создания мощных накопителей электрической энергии для питания электродинамических ускорителей.

Разработкой конденсаторов с двойным электрическим слоем занимаются фирмы: в США-Ohio Materials, The Standart Oil Co., Murata Manufacturing Co., Nippon Electric Co., Hitachi Maxele Ltd., во Франции-С-IE Generale D Electricite, Cic Europens de Composant Electroniques; в ФРГ-SiemensAG.

Наиболее интенсивно разработки конденсаторов с двойным электрическим слоем ведутся в Японии.

Описанные выше конденсаторы с двойным электрическим слоем являются зарубежными аналогами созданных в СССР так называемых молекулярных накопителей энергии. Разработки этих накопителей (конденсаторов с аномально высокой емкостью) были развернуты в 1974г. по инициативе и под руководством члена-корреспондента СССР Лидоренко Н.С. [27] и к настоящему времени они нашли применение как буферные, резервные и импульсные источники тока с временем разряда в диапазоне от 10^{-2} до 10 сек.

По совокупности удельных энергетических характеристик молекулярные накопители занимают промежуточное положение между аккумуляторами и конденсаторами традиционной конструкции.

Разработанная и внедренная в производство технология позволяет изготавливать модули накопителей на напряжения от 1 до 10^3 В, запасаемую энергию от 10^2 до 10^5 Дж.

Удельный энергозапас упомянутых накопителей достигает 1 КДж/кг и в ближайшей перспективе будет увеличен до 3-5 КДж/кг путем электрофизических исследований, совершенствования технологии, применения полимерных материалов и облегчения конструктивных элементов.

Модули молекулярных накопителей с энергозапасом по 25 КДж при напряжении 500 В, могут быть использованы как модули в проектных проработках мощных батарей накопителей (путем параллельного соединения) для систем энергоснабжения ОТС.

В заключение отметим, что приводимые в зарубежных публикациях удельные параметры накопителей не содержат указания о том, определены ли они для реальных конструкций или же отнесены к так называемой активной массе, являются ли теоретически предельными величинами и т.п.

Поэтому следует критически анализировать зарубежные публикации с целью отсева рекламных и выделения сообщений, не противоречащих динамике развития этой новой области электротехники.

6. ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ РАЗГОНА. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ ОТС.

Выдвинутая концепция безракетной индустриализации космоса с помощью ОТС требует быстрой и полной проверки с целью ее возможного перевода в проектную стадию, что может быть сделано только после специально поставленного эксперимента.

Учитывая глобальные масштабы проекта, нет другого пути для проведения экспериментов, как физическое моделирование отдельных подсистем ОТС, в частности рассматриваемой в данном отчете подсистемы электропривода ОТС. В сочетании с физическим моделированием должно проводиться математическое (аналоговое и цифровое) моделирование, не исключается также создание цифро-аналого-физических моделирующих комплексов.

Физическое моделирование, как известно, характеризуется тем, что исследования проводятся на установках, сохраняющих полностью или частично природу явлений. При физическом моделировании меняется количественная сторона этих явлений (геометрические размеры, силы, моменты, мощности и т.д.) в соответствии с критериями подобия [139].

Математическое моделирование (аналоговое, структурное и цифровое) основано на изоморфизме уравнений, т.е. их способности описывать различные по своей природе явления и выявлять различные функциональные связи.

При анализе критериев подобия для электротехнических объектов различают общую задачу-определение критериев полного подобия, т.е. подобия электромагнитных полей, и частную задачу, отвечающую неполному подобию-определению критериев подобия электрических цепей.

Нам представляется, что в результате моделирования ОТС появится набор физических и математических моделей, отражающих различные явления в основных подсистемах ОТС.

Если ограничиться системой электропривода ОТС, то в первую очередь должна быть создана ее электродинамическая модель, состоящая из физических моделей генерирующих устройств, трансформаторов, преобразователей и самого двигателя.

Анализ показывает, что создание электродинамической модели обеспечивает неполное подобие, т.е. при этом определяются критерии подобия электрических цепей, которые для названных устройств представляются схемами замещения. Таким образом, для проектирования электродинамической модели потребуются электромагнитные расчеты устройств-оригиналов, интерпретированные в виде конфигурации и параметров их схем замещения. При этом следует использовать большой опыт создания и исследования электродинамических моделей энергосистем, эксплуатируемых в нашей стране (МЭИ, ВНИИЭлектромаш). Они подробно описаны в научно-технической литературе.

Из перечисленных устройств-оригиналов наибольшую трудность для физического моделирования представляет двигатель ОТС.

Как показывает анализ, при моделировании двигателя не удается одновременно с подобием временных процессов разгона, торможения и др. получить подобие электромагнитных полей, а также подобие механических напряжений и деформаций. Это объясняется тем, что при создании относительно малой модели ОТС, например, диаметром 1 км, не сохраняется геометрическое подобие других основных размеров модели и оригинала. Действительно, ширина ротора в такой модели должна быть в $13 \cdot 10^3$ раз меньше ширины ротора в оригинале, что неосуществимо.

При создании модели двигателя не исключено использование искусственных способов изменения ее параметров: включение последовательно с обмотками двигателя дополнительных активных и индуктивных сопротивлений, уменьшение активных сопротивлений путем введения в цепи специальных компенсаторов и др.

Рассмотрим оригинал и модель двигателя ОТС, геометрически подобные в пределах одного полюсного деления и примем, что плотность тока в обмотке машины и плотность магнитного поля в воздушном зазоре и в магнитопроводе-величины постоянные, не зависящие от мощности. При этих условиях имеем зависимости, представленные в таблице:

Таблица 15

Параметры	Соотношения
Расчетная длина	l
Число пар полюсов	p
Расчетный диаметр	$D \approx 1p$
Размеры магнитопровода в пределах полюсного деления	пропорционально l
Сечения магнитопровода и катушек в пределах полюсного деления	попропорционально l^2
Сечения эффективных проводов	пропорционально $\frac{l^2 p}{W}$
Число витков на параллельную ветвь	W
Угловая геометрическая частота вращения	Ω
Угловая электрическая частота вращения	$w = p\Omega$
Магнитный поток	$\Phi = l^2 \frac{l^2 p}{W}$
Ток	$I = \frac{l^2 p}{W}$
Напряжение	$U = W\Phi w = W^2 l w$
Мощность	$S = l^4 \Omega p^2 = A^2 l^2 \Omega$
Вращающий момент	$M = l^4 p^4 = A^2 l^2$
Омическое сопротивление	$R \approx \frac{W^2}{p l}$
Индуктивное сопротивление (при частоте статора)	$x = w W^2 \frac{l}{p}$
Постоянная времени	$T \approx \frac{x}{w R} \approx 1$
Постоянная инерции	$T_j = \frac{(G \Delta)^2 \Omega^2}{M} = l w^2$
Сопротивление в относительных единицах	$\bar{x} = \frac{l x}{U}$ $\bar{R} = \frac{l R}{U}$

Таким образом, сравнивая параметры двигателя, имеющего мощность порядка единиц млн кВт (оригинал), и машин, имеющих порядка сотен киловольтампер (модель), при одинаковой угловой скорости получим по формулам указанной таблицы следующие соотношения:

$$\frac{X_M}{X_{op}} \approx 1; \quad \frac{R_M}{R_{op}} \approx 10; \quad \frac{T_j^M}{T_j^{op}} \approx 0,1$$

Следовательно, при уменьшении геометрических размеров двигателя индуктивное сопротивление примерно остаются постоянными, а активные сопротивления возрастают по величине.

Все сказанное выше в равной мере относится к трансформаторам, если l -линейный размер геометрически подобного трансформатора.

Из изложенного следует, что возможности применения типовой электрической машины в качестве физической модели двигателя ОТС весьма ограничены. Поэтому модель должна быть спроектирована специально.

При проектировании модели двигателя ОТС нет возможности сохранить в ней число пар полюсов оригинала (32×10^6). Оказывается, в этом нет необходимости, так как картина магнитного поля и плотностей токов повторяются через каждые два полюса. Поэтому модель двигателя может быть выполнена с любым удобным числом полюсов $p \geq 1$, если удастся достаточно полно выдержать геометрическое подобие в пределах одного полюсного деления.

Предположим, что число пар полюсов в модели принято равным p^M при числе пар полюсов в оригинале $p^{op} = 32 \times 10^6$. Связь между линейными размерами модели и оригинала в пределах полюсного деления характеризуется масштабом m_e :

$$\begin{aligned} \tau^M &= m_e \tau^{op} \\ l^M &= m_e l^{op} \end{aligned}$$

-полюсное деление модели и т.д.
-расчетная длина модели и т.д.

При этом масштабы частоты и времени должны быть выбраны из условия

$$m_f = \frac{1}{m_t} = \frac{1}{m_e^2}$$

Так как размеры модели должны быть на несколько порядков меньше размеров оригинала, то модель должна выполняться на весьма высокую частоту.

Частота вращения модели определяется из формулы:

$$n^M = m_n n_n \%$$

где $m_n = \frac{p^{op}}{p^M}$ - масштаб частоты вращения.

Уменьшение диаметра модели по сравнению с таковым для оригинала получается при $p^{op} > p^M$

$$D^M = m_D D^{op}$$

где $m_D = \frac{p^M}{p^{op}} \cdot m_e$ - масштаб диаметра.

При определении масштабов интегральных величин тока, магнитного напряжения, магнитного потока и напряжений следует исходить из того, что интегрирование в модели и оригинале производится по сходственным объемам, поверхностям и линиям. Формулы для определения масштабов интегральных величин сведены в таблицу:

Таблица 16

Величины	Формулы для пересчета	Формулы для масштаба
Линейный размер в пределах полюсного деления	$l^M = m_e l^{op}$	m_e
Частота	$f^M = m_f f^{op}$	$m_f = \frac{1}{m_e^2}$
Время	$t^M = m_t t^{op}$	$m_t = \frac{1}{m_f} = m_e^2$
Плотность тока	$\Delta^M = m_\Delta \Delta^{op}$	$m_\Delta = \frac{1}{m_e}$
Напряженность эл. поля	$E^M = m_E E^{op}$	$m_E = m_\Delta$
Напряженность магн. поля	$H^M = m_H H^{op}$	$m_H = 1$
Электрическая проводимость	$\gamma^M = m_\gamma \gamma^{op}$	$m_\gamma = 1$
Магнитная проницаемость	$\mu^M = m_\mu \mu^{op}$	$m_\mu = 1$
Частота вращения	$n^M = m_n n^{op}$	$m_n = \frac{p^{op}}{p^M} m$
Расчетный диаметр	$D^M = m_D D^{op}$	
Магнитное напряжение	$F^M = m_F F^{op}$	$m_F = m_e$
Ток	$I^M = m_I I^{op}$	$m_I = \frac{\alpha^M W^{op}}{\alpha^{op} W^M} m_e$
Магнитный поток	$\Phi^M = m_\Phi \Phi^{op}$	$m_\Phi = m_e^2$
Напряжение (эдс)	$U^M = m_U U^{op}$	$m_U = \frac{W^M}{W^{op}} \frac{p^M}{p^{op}} \frac{\alpha^{op}}{\alpha^M}$
Вращающий момент	$M^M = m_M M^{op}$	$m_M = \left(\frac{p^M}{p^{op}}\right)^2 m_e$
Мощность и потери	$P^M = m_P P^{op}$	$m_P = \frac{p^M}{p^{op}} m_e$
Сопротивления эл. цепей	$Z^M = m_Z Z^{op}$	$m_Z = \left(\frac{\alpha^{op} W^M}{\alpha^M W^{op}}\right)^2 \frac{p^M}{p^{op} m_e}$

Модель реализующая подобие полей, обычно соответствует оригиналу и с точки зрения подобия цепей.

В этом случае для всех контуров модели и оригинала удовлетворяются критерии подобия вида:

$$\frac{Z_i}{X_n} = idem, \quad \frac{X_i}{X_n} = idem$$

$$T^M = m_t T^{op} \text{ или } \frac{T}{t} = idem.$$

Очевидно, в системе относительных единиц сопротивления модели и оригинала получаются одинаковыми:

$$\bar{Z}^M = \frac{I_H^M Z^M}{U_H^M} = \frac{m_I m_Z}{m_U} \cdot \frac{I_H Z_{op}}{U_H^{op}} = \bar{Z}^{op}$$

Критерий подобия для постоянной инерции

$$\frac{T_j}{t} = \frac{GA}{S} \cdot \frac{n}{t} = \frac{p}{t} = idem$$

где $GA = A^2 \cdot l = (pl)^4 l$;

$S = pl$; $n = \frac{f}{p} = \frac{1}{p \cdot l^2}$; $l^2 = t = \frac{1}{f}$,
удовлетворяются при условии
 $pf = idem$
или $T_j f = idem$

Если число полюсов в модели

$$p^M < \frac{p^{op} f^{op}}{f^M},$$

то необходимое увеличение постоянной инерции можно получить с помощью маховика на валу ротора модели.

Модель двигателя ОТС, реализующая подобие полей, является инструментом для исследования и уточнения методики расчета потерь в стали и добавочных потерь в двигателе, так как при высоких частотах их расчет проводится по полуэмпирическим формулам.

Учитывая, что длина ротора двигателя оригинала не превышает 0.2 м, целесообразно из соображений механической прочности выбирать масштаб модели не менее $m = 1$.

Размеры модели по диаметру следует выбирать, исходя из задаваемых требований путем уменьшения числа пар полюсов.

В таблице даны основные параметры моделей, рассчитанных по формулам таблицы. Расчеты проводились при следующих условиях:

Во-первых, в качестве основного принято требование равенства соответствующих сопротивлений схем замещения моделей и оригинала, т.е. $m_Z = 1$.

Исходя из этого условия и таблицы 16, имеем:

$$m_Z = \frac{(\alpha^{op})^2}{p^{op} m_e} \left(\frac{W^M}{W^{op}} \right)^2 \frac{p^M}{\alpha_M^2} = 1$$

Учитывая, что принято $W^M = W^{op}$, $m_e = 1$

$$\alpha^{op} = 14 \times 10^3; \quad p^{op} = 32 \times 10^6, \quad \text{найдем: } \frac{p^M}{(\alpha^M)^2} = 0,163$$

Это отношение должно сохраняться неизменным для всех моделей.

Во- вторых, задаем величины диаметров роторов моделей. При этом исходим из того, что может понадобиться относительно небольшая по габаритам модель ($D^M=1,27$ м) для лабораторных исследований, более крупная модель для электродинамической модели системы ОТС ($D=12,7$ м), и три модели (1 27; 1270; 127×10^3 м) для полигонных испытаний, в том числе в режимах микрогравитрона и электромеханического накопителя, включенного в энергосистему.

Основные размеры моделей в рамках полюсного деления сохранены одинаковыми с оригиналом, не изменено также количество последовательных витков в фазе.

При выборе частоты моделей следует ориентироваться на результаты расчета механической прочности и виброустойчивости роторов. В таблице для удобства сопоставления моделей частоты приняты одинаковыми и равными частоте двигателя-оригинала (8кГц).

Так как при частном управлении процессом разгона ротор проходит все частоты, начиная с малых, то для каждой модели, в зависимости от конструкции подвеса ротора разгон должен завершаться при частоте, соответствующей предельно допустимой окружной скорости.

Например, предельная окружная скорость роторов современных турбогенераторов достигает 300 м/с, что примерно в 33 раза меньше требуемой для достижения невесомости. Такой скорости соответствует частота 200-250 Гц.

Могут быть и иные подходы к выбору и расчету моделей в рамках соотношений таблиц 15 и 16.

В частности, реализация многовитковых обмоток, как это рекомендовано таблицей 16, затруднительна для моделей малой мощности (малого диаметра). Для этих моделей возможен отход от рекомендуемых критериев подобия по плотности тока, числу пазов на полюс и фазу, количеству эффективных проводников в пазу и др. Важно лишь, по возможности, сохранить подобной конфигурацию (геометрию) зубцово-пазовой зоны в пределах полюсного деления.

Изложенные выше рекомендации по физическому моделированию двигателя ОТС должны быть уточнены при дальнейшей проработке самого электропривода и системы ОТС в целом.

Кроме того, прежде чем разрабатывать физические модели двигателя требуется очертить круг задач, который будет на них исследоваться. Предварительно назовем следующие:

1. Исследование режимов и электромеханических переходных процессов электропривода ОТС.
2. Исследование и уточнение расчета статической и динамической устойчивости системы электроснабжения и электропривода.
3. Исследования, направленные на уточнение характеристик системы электроснабжения электропривода.
4. Проверка теоретических положений, допущений и приближений, принятых в расчетах оригинала.
5. Проверка и настройка систем автоматического управления, регулирования и защиты в нормальных и аварийных режимах.
6. Исследование влияния накопителей энергии на поведение систем электропривода и электроснабжения.

7. Использование электродинамической модели в качестве тренажера по ликвидации аварийных режимов, для тренировки обслуживающего персонала т.п.

Основные параметры моделей	M1	M2	M3	M4	M5
Диаметр ротора, м	1,27	12,7	127	1270	$127 \cdot 10^3$
Длина ротора, м	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Число параллельных ветвей	4	14	44	140	1400
Число последовательных витков в фазе	4571	4571	4571	4571	4571
Число пар полюсов	3	32	320	$3,2 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^5$
Частота вращения, об/мин	$150 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$	1500	150	15
Окружная скорость, м/с	10^4	10^4	10^4	10^4	10^4
Частота, Гц	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$
Мощность, кВА	1,26	13,3	133	1330	$133 \cdot 10^3$
Напряжение, В	12,7	38,5	122	385	3850
Ток, А	57	200	636	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$
Масштабы:					
$m_D = m_p$	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-2}
m_I	$0,28 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$3,18 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	0,1
m_U	$0,33 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$3,18 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	0,1
m_m	$8,79 \cdot 10^{-15}$	$8,79 \cdot 10^{-13}$	$8,79 \cdot 10^{-11}$	$8,79 \cdot 10^{-9}$	$8,79 \cdot 10^{-5}$
m_z	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

7. Вопросы рекуперации энергии и торможения в системе разгона

Как упоминалось, отработка основных технических решений электропривода ОТС возможна лишь на физических моделях, технические требования к которым приведены в разделе 3, а расчетные параметры в разделе 6.

Диаметр моделей для работы в натуральных условиях составил 1,27-127 км при скорости движения ротора 1-10 км/с. Величина кинетической энергии ротора при максимальных скоростях может достигать 1,0 млрд.кВтч.

В процессе наладки моделей потребуются многократные пуски и торможения с очень большими затратами энергии. Эти затраты можно значительно сократить, если кинетическую энергию ротора в процессе торможения передать в виде электрической энергии рекуперации обратно в питающую сеть и в емкостные накопители энергии. Модель ОТС в этом случае будет работать в режиме гипернакопителя, что само по себе может иметь народно-хозяйственное значение наряду с вопросами отработки системы полномасштабного привода.

В рассмотренной (раздел 4) системе энергопитания основного асинхронного двигателя АДОТС от индукторных генераторов ИГ с приводными асинхронными двигателями АДИГ, последние и АДОТС должны быть переведены в генераторный режим, а все индукторные генераторы ИГ- в двигательный режим. Так как ИГ-синхронная машина, то она является обратимой и переводится в двигательный режим автоматически сразу после снятия момента с двигателя АДИГ и снижения частоты вращения АДОТС.

Задача, таким образом, сводится к переводу в инверторный режим системы АДИГ-автономный инвертор напряжения-управляемый выпрямитель (рис. 37,б).

Асинхронная машина является также обратимой машиной и ее перевод из двигательного режима в генераторный происходит автоматически путем изменения знака скольжения. Практически это достигается изменением алгоритма управления автономным инвертором, обеспечивающим классическое равенство частот:

$$f_1 = f_w \pm f_2,$$

где f_w -частота вращения ротора.

Знак "+" относится к двигательному режиму, а "-" - к генераторному. Приведенное равенство в системе управления реализуется сложением или вычитанием двух величин в аналоговом или цифровом виде, пропорциональным частотам f_w и f_2 .

Процесс перехода асинхронной машины из двигательного режима в генераторный очень наглядно просматривается из диаграмм фазных токов и тока на входе автономного инвертора при различных скольжениях машины (рис. 50, 61, 62).

На рис. 50 изображен двигательный (тяговый) режим работы машины при положительном скольжении. Как уже указывалось выше, заштрихованные части кривых тока являются реактивным током двигателя, который протекает через обратные диоды и замыкается между фазами. Не заштрихованные части кривых тока замыкаются через главные тиристоры и представляют собой активную составляющую тока, потребляемую двигателем через автономный инвертор от звена постоянного тока (выпрямитель- фильтр, рис. 37,б). На входе автономного инвертора ток $i_{и}$ повторяет токи фаз двигателя в интервале 60-120 эл. град. Таким образом, он пульсирует с шестикратной частотой и произведение среднего значения этого тока на среднее значение напряжения

на входе инвертора представляет собой активную мощность, потребляемую асинхронным двигателем за вычетом потерь в автономном инверторе.

При уменьшении скольжения двигателя, заштрихованные части кривых фазных токов увеличиваются. На рис.61 показан переходной режим работы двигателя-режим синхронизма, когда скольжение двигателя $f_2 = 0$. Заштрихованные части кривых фазных токов чуть меньше незаштрихованных частей. Кривая тока инвертора $i_{и}$ сместилась вниз с некоторым превышением положительной составляющей над отрицательной на величину потерь в обмотке статора. Так как момент двигателя равен нулю, система электропитания должна обеспечивать намагничивающую мощность и покрывать потери холостого хода.

На рис.62 показан случай, когда асинхронный двигатель работает с отрицательным скольжением. Кривая тока инвертора $i_{и}$ сместилась вниз и явно свидетельствует об изменении направления потока энергии. Электродвигатель не потребляет, а отдает энергию в звено постоянного тока, т.е. работает в генераторном режиме рекуперации. Звено постоянного тока должно принять и передать энергию двигателя в сеть. Так как на пути энергии стоит выпрямитель В (рис.375), необходимо преключить полярность выпрямителя и перевести его в режим ведомого сетью инвертора. Выпрямитель, естественно, должен быть полностью управляемым.

Работы над асинхронным тяговым приводом электроподвижного состава показали, что можно избежать переключения полярности управляемого выпрямителя, если обратные диоды в автономном инверторе Д1-Д6 заменить тиристорами и изменить алгоритм управления инвертором. Для этого необходимо управляющие импульсы с главных тиристоров переключить на тиристоры обратного моста противоположной группы, а на главные тиристоры подавать управляющие сигналы после запираания обратных тиристоров. Такая схема проверена на натурном стенде с асинхронным частотно-регулируемым приводом электроподвижного состава мощностью 1200 кВт.

Подключение емкостного накопителя энергии на основе, например, конденсаторов с двойным электрическим слоем для сбора энергии рекуперации не вызовет технических трудностей при практической реализации, однако в этом случае напряжение должно регулироваться либо способом широтно-импульсной модуляции, либо с помощью импульсного прерывателя на входе автономного инвертора. Требуемые энергозапасы накопителей составляют сотни МДж, что требует интенсификации их разработки и производства.

Кроме рассмотренного варианта рекуперативного торможения в системе ОТС и ее моделях найдут применение системы торможения постоянным током с использованием емкостных накопителей и система с использованием компенсирующих устройств.

При этом наиболее целесообразным может оказаться сочетание различных способов торможения при использовании управляющих и информационных аналого-цифровых систем.

Наиболее эффективным и универсальным является совмещение режимов конденсаторного и динамического торможения (конденсаторно-динамическое торможение). Этот способ может иметь много схемных решений с учетом использования накопителей энергии и компенсирующих устройств. Его применение особенно эффективно для приводов типа ОТС, обладающих большими инерционными постоянными. В нем совмещаются преимущества динамического торможения, наиболее эффективного при малых и средних скоростях, и конденсаторного торможения, создающего значительные тормозные усилия при высоких скоростях.

Учитывая малую изученность тормозных процессов двигателя при использовании накопителей и компенсирующих устройств, целесообразна постановка специальных теоретических и экспериментальных исследований динамических режимов двигателя с привлечением методов цифрового, аналогового и физического моделирования.

Известные к настоящему времени способы анализа динамического торможения разделяются на три основные группы в соответствии с принятой моделью режима динамического торможения:

- а) асинхронная машина рассматривается как неявнополюсный синхронный генератор переменной частоты;
- б) динамическое торможение считается эквивалентным двигательному режиму, причем протекающий по обмотке статора постоянный ток эквивалентен переменному току;
- в) питание обмотки статора постоянным током считается частным случаем питания переменным током при $f_1=0$.

Что касается конденсаторного торможения, то форма и характер изменения тормозного момента двигателя в этом случае определяется, в основном, явлениями емкостного самовозбуждения, представляющими собой особый вид неустойчивости в колебательном контуре "индуктивность машины-емкость".

Следует отметить, что исключительная важность системы торможения для безопасности движения ОТС побуждает выбирать в качестве тягового односторонний двигатель, обладающий по сравнению с двухсторонним следующими преимуществами в тормозных режимах:

- возможность использования горизонтальной вторичной части с большей поверхностью для создания тормозящих вихревых токов;
- меньшая вероятность механических качаний при вибрациях, вызываемых тормозным процессом;
- использование свойственной односторонним двигателям способности к самоориентированию с обеспечением соосности статора и ротора.

Заключение

1. Электродинамические ускорители макротел до сверхвысоких скоростей находятся в стадии широких расчетно-теоретических исследований, моделирования и экспериментирования. Их разработки в США имеют конечной целью создание кинетического оружия наземного и космического базирования для поражения космических, наземных и морских целей различного назначения. Их предполагается использовать также в качестве электромагнитных катапулт для запуска самолетов космических станций, радиоактивных отходов и других грузов. Основное внимание зарубежных специалистов сосредоточено на создании рельсовых ускорителей, способных разгонять тела массой единицы-десятки грамм до скоростей 1-10 км/с. Для разгона тел массой 0,5-2 кг до скоростей единицы километров в секунду потребуются источники энергии с энергозапасом в сотни мегаджоулей.

2. В качестве источников импульсной энергии для питания электродинамических ускорителей могут использоваться емкостные, индуктивные и электромашинные накопители. Емкостные накопители на базе конденсаторов традиционного исполнения имеют показатели, не удовлетворяющие предъявляемым по удельной энергии, стоимости, эксплуатационной надежности. Однако интенсивно ведущиеся разработки традиционных конденсаторов с молекулярными пленками и новых конденсаторов с двойным электрическим слоем позволяют надеяться на перспективу их использования в качестве импульсных источников при условии достижения удельного энергозапаса до 5-10 Дж/г. В составе ОТС они найдут применение как накопители электрической энергии для приема и возврата энергии торможения ротора ОТС, как буферные и резервные источники питания, а также в неполярном исполнении как компенсирующие устройства для снижения потерь реактивной энергии и повышения коэффициента мощности электропривода. Автономно или в сочетании с другими типами накопителей перспективно их использование в крупных физических моделях ОТС в качестве гипернакопителей.

3. В отличие от электродинамических ускорителей, скорость разрабатываемых в СССР и за рубежом систем высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) ограничена величиной 0,13 км/с, что не удовлетворяет предъявляемым требованиям к ОТС. Однако большой опыт выполненных расчетно-экспериментальных исследований, проектных работ и полигонных испытаний в части линейного электропривода, магнитного подвеса, систем электроснабжения, токосъема, электроподвижного состава и эстакадных путей должен быть взят за основу на начальной стадии создания ОТС и ее физических моделей.

4. В результате анализа современного технического уровня, масштабов и сроков разработки линейных двигателей за основной вариант для электропривода ОТС принят асинхронный тип двигателя с учетом известных его достоинств, а также того, что при реализации приведенных в отчете предложений по компенсации реактивной мощности со стороны вторичной цепи его тягово-энергетические показатели могут быть доведены до предельных значений.

5. Предложенная методология расчета выбранного асинхронного двигателя позволяет оперативно проводить инженерные оценки и сопоставление различных его вариантов исходя из предъявляемых требований по массе полезного груза и скорости ротора. Требуется доработка методических основ расчета и проектирования двигателя с учетом других

подсистем с привлечением ЭВМ для оптимизации его характеристик в рамках системного анализа ОТС.

6. Расчет асинхронного двигателя с суммарной массой ротора 200 тыс. тонн при его скорости 10 км/с показал, что при условии выбора линейного напряжения 38,5 кВ и частоты 8кГц достигаются приемлемые массо-габаритные и энергетические показатели. Ожидается к.п.д. двигателя не хуже 0,9 при коэффициенте мощности для варианта с фазно-короткозамкнутой обмоткой на роторе 0,65. Пиковая активная мощность двигателя (при достижении скорости 10 км/с за 1000ч) составит, примерно, 8 млн.кВт. Коэффициент мощности и тяговые характеристики двигателя могут быть улучшены при использовании в его вторичной цепи компенсирующих устройств.

7. В результате анализа возможных структурных схем электропитания асинхронного двигателя ОТС от статических и электромеханических преобразователей напряжения и частоты выбрана схема с электромеханическим преобразователем на базе высокочастотного индукторного генератора.

8. Электропривод ОТС по своим пуско-регулирующим характеристикам следует рассматривать как тяговой электропривод, наиболее близким прототипом которого является привод электроподвижного состава.

9. Регулирование скорости приводного двигателя индукторного генератора электромеханического преобразователя целесообразно осуществить от автономного инвертора напряжения со звеном постоянного тока с реализацией закона постоянства пускового момента тягового усилия по способу академика М.П.Костенко.

10. Система питания ОТС должна иметь накопители энергии в звене постоянного тока преобразователей и компенсирующие устройства для покрытия дефицита энергии в периоды наибольшей загрузки питающей сети.

11. Количество каналов подвода электроэнергии к двигателю ОТС может быть равно и кратно количеству параллельных ветвей статорной обмотки асинхронного двигателя.

12. При использовании ОТС и ее физических моделей в качестве гипернакопителей система электропривода должна быть приспособлена для автоматического перевода в режим электрического торможения с рекуперацией электроэнергии в первичную сеть и в статические накопители энергии. Такой перевод возможен в предложенной системе электропитания и электропривода.

13. Проведенные расчетные оценки физических моделей для лабораторных и полигонных испытаний и отработки электропривода и двигателя ОТС позволяют приступить к разработке технических заданий на их проектирование с учетом одновременного использования в качестве гипернакопителей для задач крупной электроэнергетики.

14. Для реализации проектов ОТС и ее моделей необходимо уделить особое внимание подсистеме бесконтактного (магнитного) подвеса и стабилизации ротора ОТС, что представляет самостоятельную научно-техническую задачу. Одновременно должны проводиться расчетно-теоретические и экспериментальные исследования на моделях динамики и механической прочности ротора ОТС.

15. Целесообразно на фундаменте научно-технических достижений по электродинамическим ускорителям и высокоскоростному транспорту с магнитным подвесом продолжить поиск новых оригинальных решений по электромагнитным системам разгона крупных тел (грузов) до сверхвысоких скоростей.

16.С целью мобилизации и координации усилий и финансовых средств целесообразно заинтересованным организациям и специалистам разработать технико-экономические обоснования и проекты межотраслевых и отраслевых (например, электротехнической) программ работ по проблеме ОТС и представить ее в государственные органы (ГКНТ, АН СССР и др.) на рассмотрение и утверждение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.С.Хоук и др. Электромагнитные рельсовые метатели: возможности прямого запуска тел в космос. "Аэрокосмическая техника", т.1, N2, февр. 1983 г., с. 110-120.
2. А.Э.Юницкий. В космос-без ракеты. "Техника и наука", N4, 1987г., с. 40-43.
3. А.Э.Юницкий. "Спасательный круг" планеты. "Век XX и мир", N5, 1987г., с. 14-19.
4. А.Э.Юницкий. Пересадочная, космическая, кольцевая. "Изобретатель и рационализатор", 1982г., N4, с. 28-29.
5. А.Э.Юницкий. В космос...на колесе. "Техника молодежи", 1982г., N6, с. 34-36.
6. К.С.Демиргян и др. Лунное топливо солнечного происхождения. "Энергия: экономика, техника, экология", 1987г., N2, с. 82.
7. Экспресс-информация по материалам иностранной печати. Серия "Авиационная и ракетная техника", N1391 за 1986г.
8. Электромагнитные пусковые установки. Обзор. НИИЭЛЕКТРО, март, 1981г.
9. Woodson K.H., Weldon W.F. "Energy Considerations in Switching Current from an "Industriive Store into a Railqun", 1983.
10. Marshall R.A., Weldon W.F. "Analysis of Performance of Railqun Accelerators Rowered by Distributed Energy Stores", 1980.
11. Г.Колм, П.Монгю, Ф.Уильямс. "Электромагнитные пусковые установки". IEEE Transartion on Magnetics vol mag 16 N5 1980 p719.
12. Weldon W.F. at all. Conf on Energy Storage, Compression and switching. Torino, Italy. Nov. 1974.
13. IEEE Transactions on Magneties Vol Mag 20 N2 march 1984.
14. Cryogenics, Dec. 1976, p699 Cowan. M. at all.
15. Экспресс-информация. Авиация и ракетная техника. N1391, за 1986г.
16. Electromagnetic Railgan Launchers. AIAA 1982 V20 N7 p978-985.
17. Knoepfel H. Pulsed High Magnetic Fields Amsterdam. Netherland 1970 p80.
18. Aviathion week and space Technology vol 119 V23 dec 1983, p62.
19. Aviathion week and space technology vol 124 N4 1986, p92.
20. Development of a modular Electromagnetic Launcher System for the air foree Armanent Laboratory. IEEE Transactions on Magnetics vol mag 20 N2 march 1984.
21. Техническая информация. сер. "Авиационная и ракетная техника" N 3-4, 1986г., с. 20, ЦАГИ.
22. IEEE Transactions on magnetics, V.22 N6, 1986, p.1510-1515 (1.3,1.4,1.6), 1733-1738, 1584-1590 (1.3); 1389-1394, 1790-1792 (1.5); 1632-1640 (1.6); 1435-1440, 1823-1825, 1641-1644 (1.8); 1790-1792 (1.9); 1536-1540 (1.13); 1429-1434 (1.14); 1453-1458 (1.15).
23. IEEE Transactions kn Magnetics, V.20, N2, 1984, p.p.260-263 (1.9-1.10); 239-242 (1.13); 287-290 (1.4); 231-234, 340-343 (1.15).
24. IEEE Transactions on Magnetics, 1982, p.190-195 (1.15).
25. Phisics E: Su Instrum V.16, 1983, p.1325-1330 (1.13).
26. Т.Г.Сорокер, В.И.Родин, Э.К.Стрельбицкий, И.П.Копылов. Развитие асинхронных двигателей общего назначения. "Электротехника", 1978г., N9, с. 3-7.
27. Н.С.Лидоренко. Аномальная электрическая емкость и экспериментальные модели гиперпроводимости. ДАН СССР, 1974г., т.216, N6, с. 1261-1262.
28. Н.С.Лидоренко, Г.Ф.Мучник, А.М.Иванов. А.с. N84552.

29. Н.С.Лидоренко, Г.Ф.Мучник, А.М.Иванов, Л.И.Поляшов, А.Ф.Герасимов, В.Ф.Харитонов. Некоторые примеры практического применения. Всесоюзный бюллетень. Новые методы получения энергии. (Проблемы электродинамики границы раздела фаз), 1977г., с. 11-13.
30. В.С.Кулебакин. Об ускорении процесса реверсирования асинхронных двигателей с помощью статических конденсаторов. Известия АН СССР. ОТН, 1938г., N3, с. 3-41.
31. Н.С.Лидоренко, Г.Ф.Мучник, А.М.Иванов, Л.И.Поляшов. Всесоюзный бюллетень. Новые методы получения электроэнергии. М., 1977г., N1, вып.4, с. 3-9.
32. Н.С.Лидоренко, Г.Ф.Мучник, А.М.Иванов, Л.И.Поляшов. А.с. N97851 от 03.08.76. Асинхронный двигатель с фазным ротором.
33. Н.С.Лидоренко, Г.Ф.Мучник, А.М.Иванов, Л.И.Поляшов. А.с. N97852 по заявке N2590016/07 от 21.05.75. Короткозамкнутый ротор для асинхронного двигателя.
34. Н.С.Лидоренко, Г.Ф.Мучник, А.М.Иванов, Л.И.Поляшов. А.с. N109145 по заявке N 2200414/07 от 25.02.76. Асинхронный двигатель с глубокими пазами и молекулярными конденсаторами на роторе.
35. Н.С.Лидоренко, Г.Ф.Мучник, А.М.Иванов, Л.И.Поляшов, В.Н.Щетнев, М.М.Шибанов. А.с. N713480 от 05.10.79. Ротор асинхронного двигателя.
36. А.М.Иванов, В.И.Кузнецов, Г.Ф.Мучник, Л.И.Поляшов, В.Н.Щетнев. А.с. N130917 от 06.06.79 по заявке N2242578/07. Секция обмотки электрической машины.
37. А.М.Иванов, В.И.Кузнецов, О.Г.Федоров. А.с. N143061 от 13.06.79. Секция обмотки электрической машины.
38. Г.К.Белов, А.М.Иванов, Э.П.Клименко, Н.С.Лидоренко, Г.Ф.Мучник, А.Ю.Никтин, Л.И.Поляшов, В.И.Радин, В.Н.Щетнев. А.с. N215561 от 02.02.79 по заявке N2233811/07 от 22.09.76. Двухслойная стержневая обмотка.
39. Т.Г.Сорокер. Поверочный электрический расчет многофазного асинхронного двигателя. Труды ВНИИЭМ, 1959г., Т.3., с. 112.
40. М.П.Костенко, Л.М.Пиотровский. Электрические машины. ч.II. Энергия, М., 1965, с. 704.
41. Асинхронные двигатели общего назначения. Под ред. В.М.Петрова и А.Э.Кравчика. Энергия, М., 1980г., с. 488.
42. А.Е.Загорский. Электродвигатели переменной частоты, Энергия, 1975г.
43. В.Н.Андреев, Ю.А.Сабитин. Основы электропривода. ГЭИ, 1956г.
44. М.Г.Чиликин. Общий курс электропривода, Энергия, 1971г.
45. Г.Н.Петров. Электрические машины, ч.II, ГЭИ, 1963г.
46. А.М.Вольдек. Электрические машины, Энергия, 1974г.
47. М.П.Костенко. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов. "Электричество", 1925г., N2.
48. Ратковский Ф. Электрификация железных дорог нормальной колеи однофазным переменным током частотой 50 Гц и система преобразования частоты. "Венгерская тяжелая промышленность", Будапешт, 1953, N12.
49. Тихменев Б.Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями, Трансхелдориздат, 1958.
50. Завалишин Д.А., Шукалов В.Ф. Вентильные преобразователи частоты, предназначенные для частотного регулирования скорости асинхронных двигателей. "Вестник электропромышленности", 1961, N6.
51. Скороваров В.Е. Автономные инверторы напряжения на кремниевых управляемых вентилях. "Электричество", 1964, N5.
52. Ситник Н.Х., Некрасов Л.Т., Боркович Е.И., Ягунов С.М. Автономные инверторы с отделенными от нагрузки конденсаторами. М., Энергия, 1968.

53. Жемеров Г.Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. М., Энергия, 1977г.
54. Завалишин Д.А., Эттингер Е.Г. Перспективы развития вентильного электропривода переменного тока. "Электротехника", 1964, N2.
55. Булгаков А.А. Основы динамики управляемых вентильных систем. М., Изд-во АН СССР, 1963.
56. Бернштейн И.Я. Тиристорные преобразователи частоты без звена постоянного тока. М., Энергия, 1968.
57. Бернштейн А.Я., Гусяцкий Ю.М., Кудрявцев А.В., Сарбатов, Р.С. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе. М., Энергия, 1980.
58. Аранчий Г.В., Жемеров Г.Г., Эпштейн И.И. Тиристорные преобразователи частоты для регулируемых электроприводов., М., Энергия, 1968.
59. Баранов Б.К., Стромин Б.А. Вентильный электродвигатель. "Электричество", 1967, N5.
60. Тихменев Б.Н., Горин Н.Н., Кучумов В.А., Сенаторов В.А. Вентильные двигатели и их применение на электроподвижном составе. Изд-во "Транспорт", 1976.
61. Алексеев А.Е. Тяговые электродвигатели. М., Трансжелдориздат, 1951.
62. Кривицкий С.О., Эпштейн И.И. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами. М., Энергия, 1970.
63. Специальные электрические машины. Под редакцией А.И.Бертинова. М., Энергоиздат, 1982.
64. Задорина Н.А., Радионов Н.И. Автономный инвертор с автоматической стабилизацией тока коммутации. "Электротехника", 1984, N12.
65. Радионов Н.И., Быков Ю.Г. Особенности коммутационных процессов в автономном инверторе напряжения применительно к тяговому асинхронному приводу.-В кн.: Современные задачи преобразовательной техники. Киев, ИЗД АН УССР, 1975, ч.6.
66. А.с. 543111 (СССР). Автономный трехфазный инвертор. В.В.Литовченко, Н.И. Радионов и др. Оубл. в Б.И., 1977, N2.
67. Радионов Н.И., Литовченко В.В., Задорина Н.А. и др. Стабилизация коммутационной способности автономного инвертора напряжения. "Электротехника", 1980, N10.
68. Быков Ю.Г., Задорина Н.А., Радионов Н.И. и др. Исследование устройства отвода избыточной энергии от узла коммутации мощного автономного инвертора напряжения. В кн.: Проблемы преобразовательной техники. Киев, ИЗД АН УССР, 1979, т.2.
69. Задорина Н.А., Литовченко В.В., Радионов Н.И. Исследование коммутационных узлов автономных инверторов электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями. Электропромышленность. Сер. Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование. М., Информэлектро, 1980, вып. 1 (67).
70. А.с. 1067577 (СССР). Трехфазный инвертор. Н.И.Радионов. Оубл. в Б.И., 1984, N1.
71. А.с. 982504 (СССР). Устройство для синхронизации системы управления тиристорного преобразователя. В.И.Монастырский, Н.И.Радионов, М.А.Суворов.
72. А.с. 982503 (СССР). Устройство для синхронизации системы управления тиристорного преобразователя. Н.И.Радионов, М.А.Суворов.
73. А.с. 708459 (СССР). Устройство для защиты преобразователя. Н.А.Задорина, Н.И.Радионов и др. Оубл. в Б.И., 1980, N1.
74. А.с. 828306 (СССР). Устройство для защиты автономного тиристорного инвертора. Н.И.Радионов. Оубл. в Б.И., 1981, N17.

75. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. М., Энергоиздат, 1981.
76. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М., Энергия, 1979.
77. Шипилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. М., Энергия, 1969.
78. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением. Л.П.Петров, В.А.Ладензон, Р.Г.Подзолев, А.В.Яковлев. М., Энергия, 1977.
79. Яцук В.Г. и др. Принципы построения частотно-регулируемых электроприводов на базе ТПЧ со звеном постоянного тока. Промышленная энергетика, 1978, NII.
80. Яуре А.Г., Певзнер Е.М., Ровинский П.А. Частотно-регулируемые электроприводы грузоподъемных механизмов с непосредственными преобразователями частоты. В кн.: Тиристорные электроприводы с асинхронными двигателями. Свердловск, УПИ, 1974.
81. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Преобразователи частоты для управления асинхронными двигателями. М., Энергия, 1966.
82. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Частотное управление асинхронными двигателями. М., Энергия, 1966.
83. Сандлер А.С. Регулирование скорости вращения мощных асинхронных двигателей. М., Энергия, 1966.
84. Сандлер А.С., Гусяцкий Ю.М. Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией. М., Энергия, 1968.
85. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М., Энергия, 1974.
86. Populax Siemens, 1987, V.231, п.2, P. 54-58.
87. IEEE Transactions on Magnetics, vol.22, п.6, nov.1986, p. 1717-1721.
88. 4-th IEEE Pulsed Power Conference, 1983, June, p.80-83.
89. IEEE Transactions on Magnetics, 1984, v.20, N2, p.259-269.
90. Патент США, рег. N 4.327.400, опубл. 11.04.1982, НКИ 361/433.
91. Патент США, рег. N 4.597.028, опубл. 24.01.1981, НКИ 361/365.
92. Journal Electrochemical Society, 1984, v.131 N6, p.1457-305.
93. Патент США, рег. N 4542444, опубл. 17.09.1986, НКИ 361/433.
94. Патент США, рег. N 4604788, опубл. 12.08.1986, НКИ 29/570.
95. Патент США, рег. N 4531281, опубл. 30.06.1985, НКИ 29/570.
96. Патент США, рег. N 4597028, опубл. 24.06.1986, НКИ 361/305.
97. New Material and New Process, 1985, v.3, p. 352-356.
98. Патент США, рег. N 4.562511, опубл. 31.12.1985, НКИ 361/364.
99. Патент США, рег. N 4.605089, опубл. 12.08.1986, НКИ 361/433.
100. Патент США, рег. N 4.622611, опубл. 11.11.1986, НКИ 361/433.
101. Патент США, рег. N 4.488.203, опубл. 11.02.1984, НКИ 361/433.
102. Заявка ФРГ, NP34297685, опубл. 02.02.1986, МКИ.C25.B11/12.
103. Заявка, Франция, рег. N256400, опубл. 06.12.1985, МКИНО1, G 4/20.
104. Заявка, Франция, рег. N2568574, опубл. 07.02.1986, МКИ C 08, G 65/00.
105. Journal of Materials Science Letters, 1986, v.5, N4, p.415-417.
106. IEEE Transactions on Magnetics, vol.22, N6, p.1717-1721.
107. 4-th I IEEE Pulsed Power Conference 1983, June, p.80-83.
108. IEEE Transactions on Magnetics, vol.MAG-19, N3, 1081-1085.
109. IEEE Transactions on Magnetics, 1987, vol.MAG-23, N2, 1331-1335.
110. IEEE Transactions, 1986, N6, p.1489-1494, 1619, 1386-1388, 1623-1627, 1516-1520, 1653-1657, 1793-1798.
111. IEEE Transactions on Magnetics, 1986, v.MAG-18, N1, p.64-67.

112. IEEE Transactions on Magnetics, 1986, v.MAG-22, N6, p.1475-1480.
113. IEEE Transactions on Magnetics, 1984, vol.MAG-20, N2,p.320-323.
114. 4th IEEE Pulsed Power Conference, 1983, p.19-21.
115. IEEE Transactions on Magnetics, 1984, MAG-20, N2,p.316-319.
116. Transrapid-Innovation fur das nachste Jahrhundert. Parnitzke R.A. "Verker und Techn", 1983, 36 N10 s.363-364,366-368,370.
117. HSST 03 system. Suruki S., Kamashima H.,Hosoda H., Tanida T."IEEE Trans. Magn.", 1984, 20 N5,Pt2, p.1675-1677.
118. JNR raises magiev speeds. Tanaka H."Int.Railway J", 1984,24 N6.
119. Накасима Себун "Тэцубо добоку", 1984, 26, N4, с.219-224.
120. Japan studies maglev metro. "Jnt. Railway J.", 1984, 24, N10, p.65.
121. Versuchslage fur den anwendungs nahen Betrieb einer Magnetbahn in der BRD, "DDR-Verkehr",1984,17, N4, s.123-125.
122. Die Magnetbahnentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland, Entwicklungslinien, Ergebnisse und Weiterfuhung. "ETR. Eisenbahn tehn Rdsch", 1984, 33, N4, s.303-309.
123. Maglev technology and Transrapid 06. "Mod. railways", 1984,41, N435, p.655-656.
124. Geschwindigkeitsrekord fur Transrapid 06. "ITR Eisenbahntechn Rdsch", 1984, 33, N9, s.725.
125. Heeft de magneettrein de toekomst 2 Uffing Hans. "Openbaar vervoer", 1984,17, N1, s. 12-15.
126. Elektrische Maschinen. 1983, N6, s.172-173.
127. Eisenbahntechnische Rundschau, 1984, Jg 33, N6,s.515-518.
128. Zeitschrift fur Eisenbahnwesen Glassers Annalen. 1983, Jg. 107 N12, s. 401-404.
129. First revenue maglev opening in Britain. "Railway Age", 1984, 185, N4, p. 28.
130. Birmingham scores a world first. "Jnt Railway J.", 1984, 24, N3, p.61-62.
131. Орешенкова В.Г., Голуб Л.Ю. Новый тип резервного источника питания. Научно-технический реферативный сборник "Электротехническая промышленность. Хим. и физ. источники тока", М., 1984, вып. 1 (94).
132. Козаченко Е.В. Линейные тяговые электродвигатели. Обзорная информация. Серия I, вып. 3, Информэлектро, М., 1984.
133. Сергеев П.С., Виноградов М.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. "Энергия", М., 1969.
134. Важнов А.И. Электрические машины. "Энергия", 1969.
135. Высокоскоростной наземный транспорт с линейным приводом и магнитным подвесом (В.И.Бочаров, В.А.Винокуров, В.Д.Нагорский и др.)-М.: Транспорт, 1985.
136. Бочаров В.И., Винокуров В.А., Поляшов Л.И. и др. Вторичный элемент одностороннего линейного асинхронного двигателя. Авт. св. СССР N839419, 1980.
137. Bocharov V.I., Vinokurov V.A., Polyashov L.I. и др. Linear induction motor and a secondary element therefor, Англ. пат., кл. H02K 41/02, N2114378, заявл. 03.02.82г.
138. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию (Под ред. А.А.Федорова. Т2. Электрооборудование.-М.:Энергоатомиздат, 1987.
139. В.А.Веников. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики "Высшая школа", М., 1966.
140. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч.2-л. "Энергия", 1956 г.

141. Постников И.М. Проектирование электрических машин.-Киев: Гостехиздат УССР, 1960.
142. Хехерин Р.П. Индукторные генераторы.-ГЭИ, 1961.
143. Современное состояние и перспективы развития новых специализированных видов транспорта, тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции (Москва, 3-5 октября 1985г.)-М., 1985.
144. Ямамура С. Теория асинхронных линейных электродвигателей, пер. с японск., "Мир", 1983.
145. Geogre A Kemeny, Пат. США, N 4319168, 09.03.82.
146. Waldemar H.Kurher, Пат. США, N 4432333, 21.02.84

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ
РАЗГОН ОБЪЕКТА НЕОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ В
ВАКУУМНОМ КАНАЛЕ ДО СКОРОСТИ 10 км/с
(дог. № 16/ОТС)

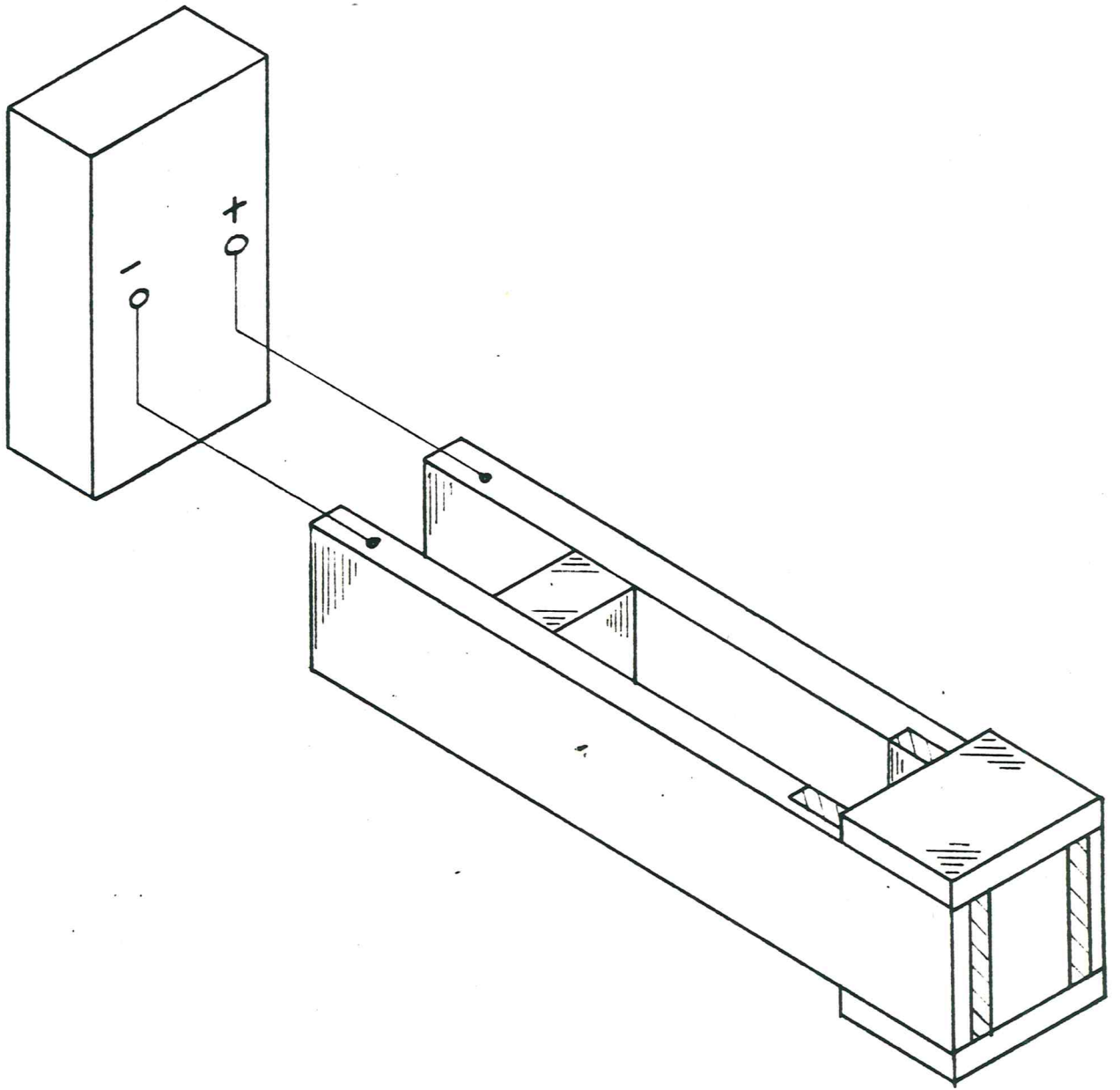
Руководитель
творческого коллектива

Поляшов
200189

Л.И.Поляшов

Заказчик: Центр "Звездный мир"
Работа выполнена за счет
средств, выделенных Советским
фондом мира на совместную про-
грамму "Звездный мир"
(Пост. бюро Правления Советского
фонда мира от 25 мая 1988 г.
№ 34-88/6)

Москва 1989 г.



Puc. 1

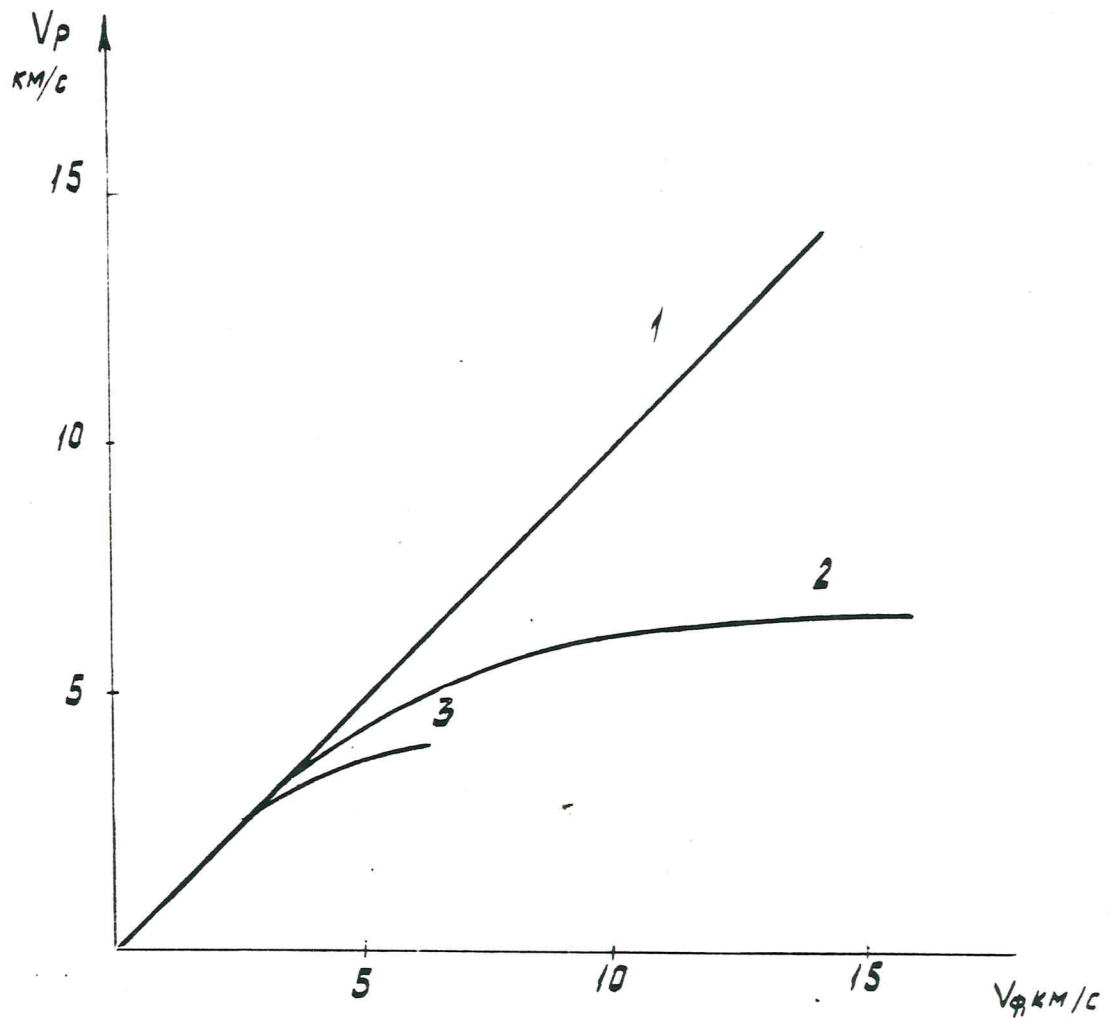
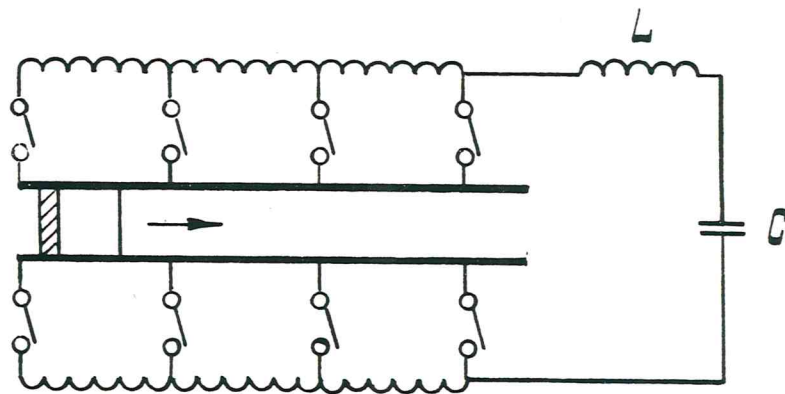
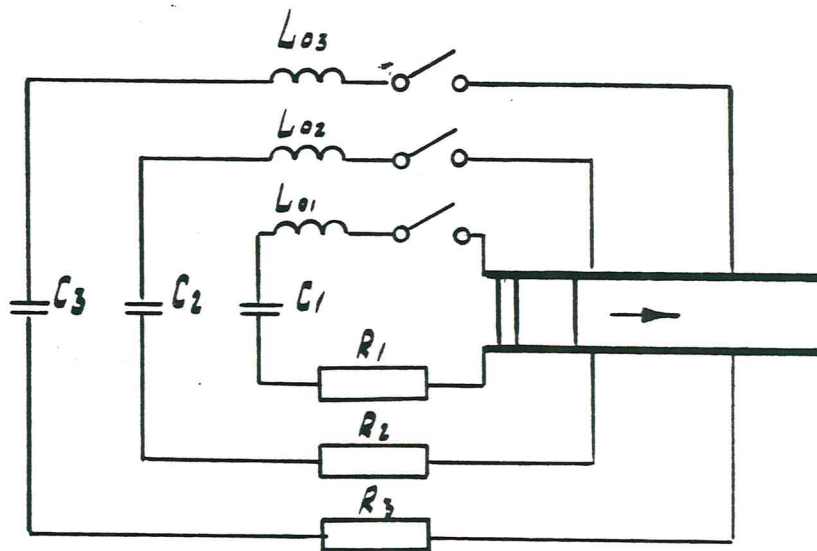


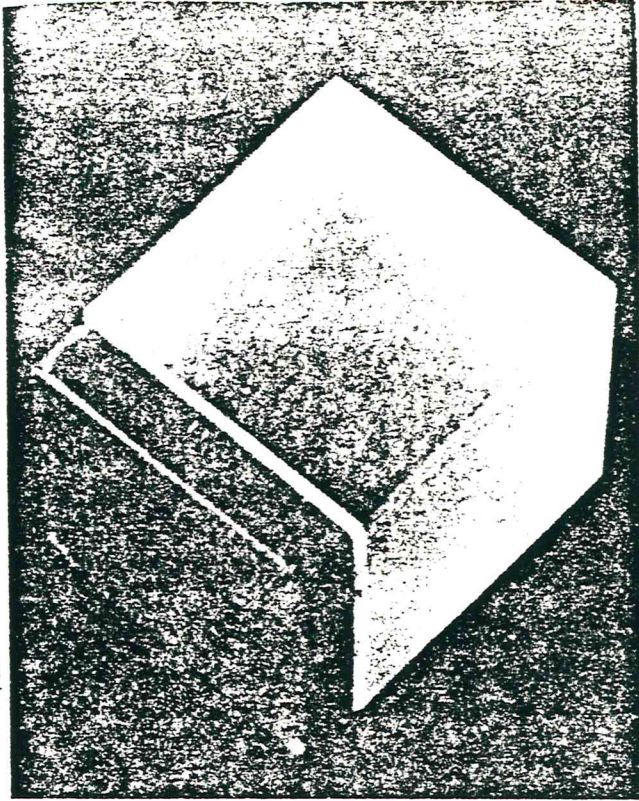
Рис. 2



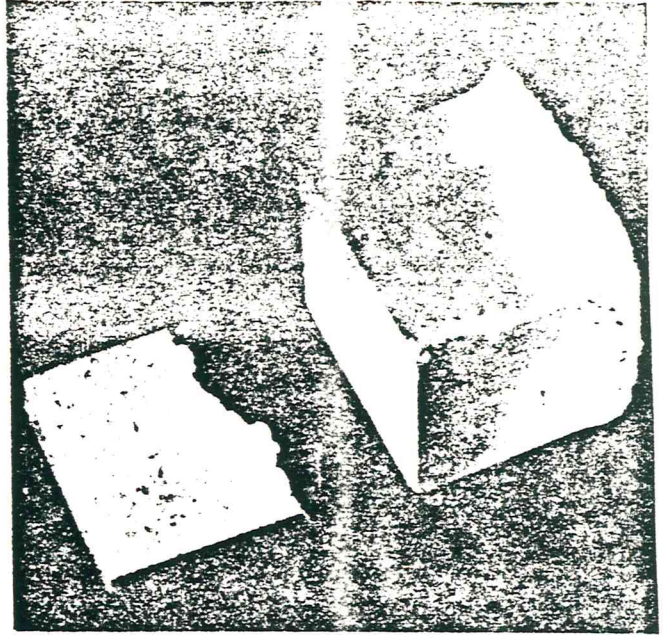
Rc 3



Ruc 4



(a) Pre-launch



(b) Experiment 1A



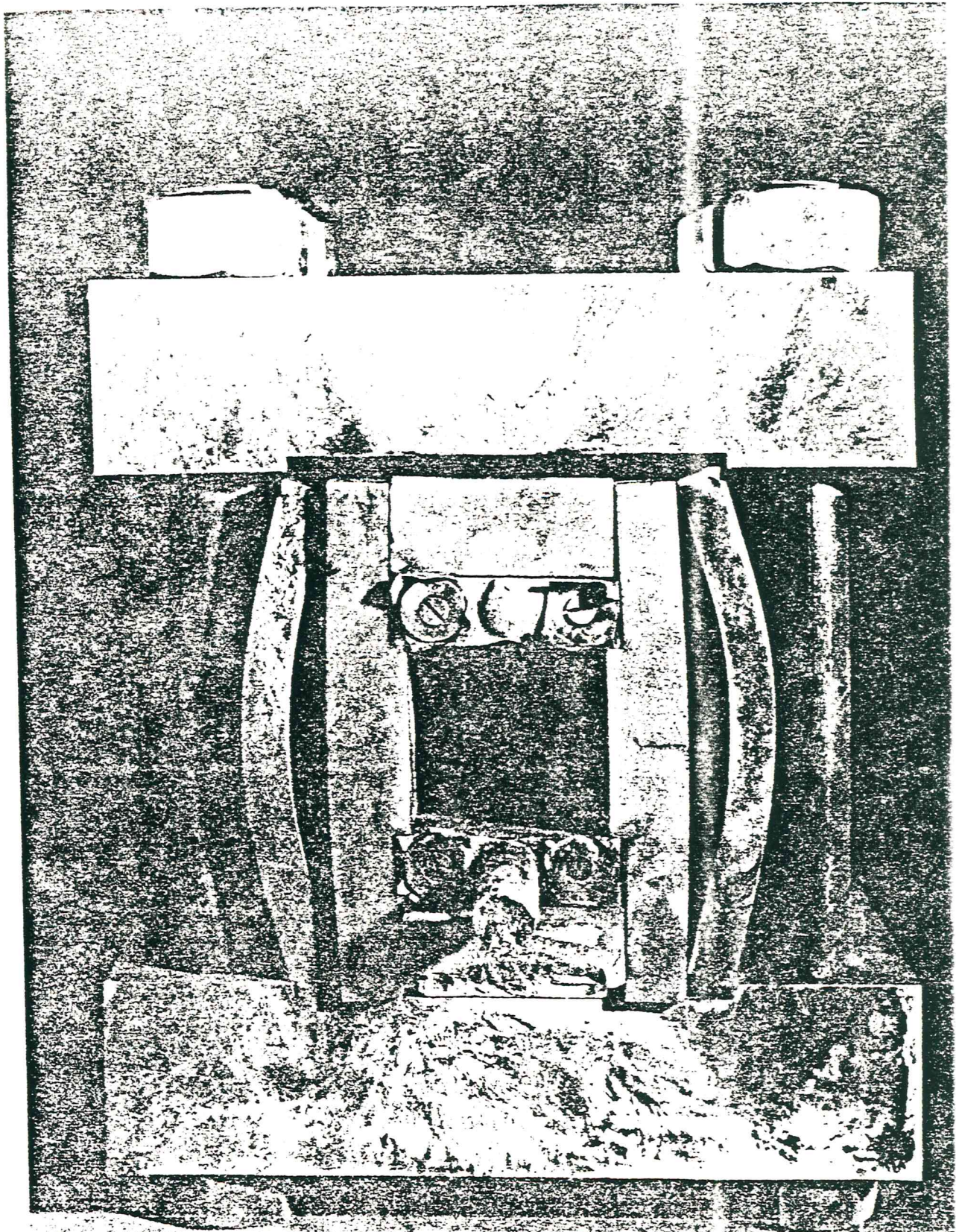
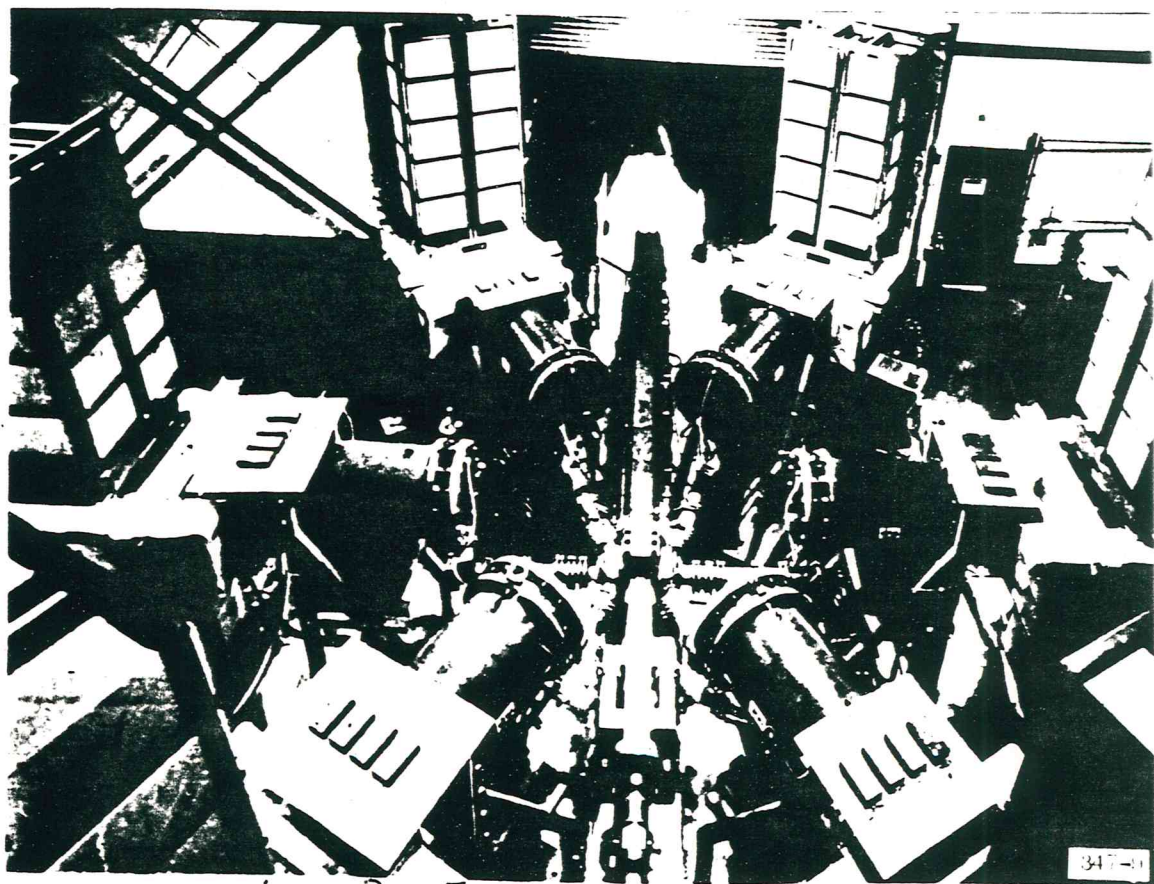
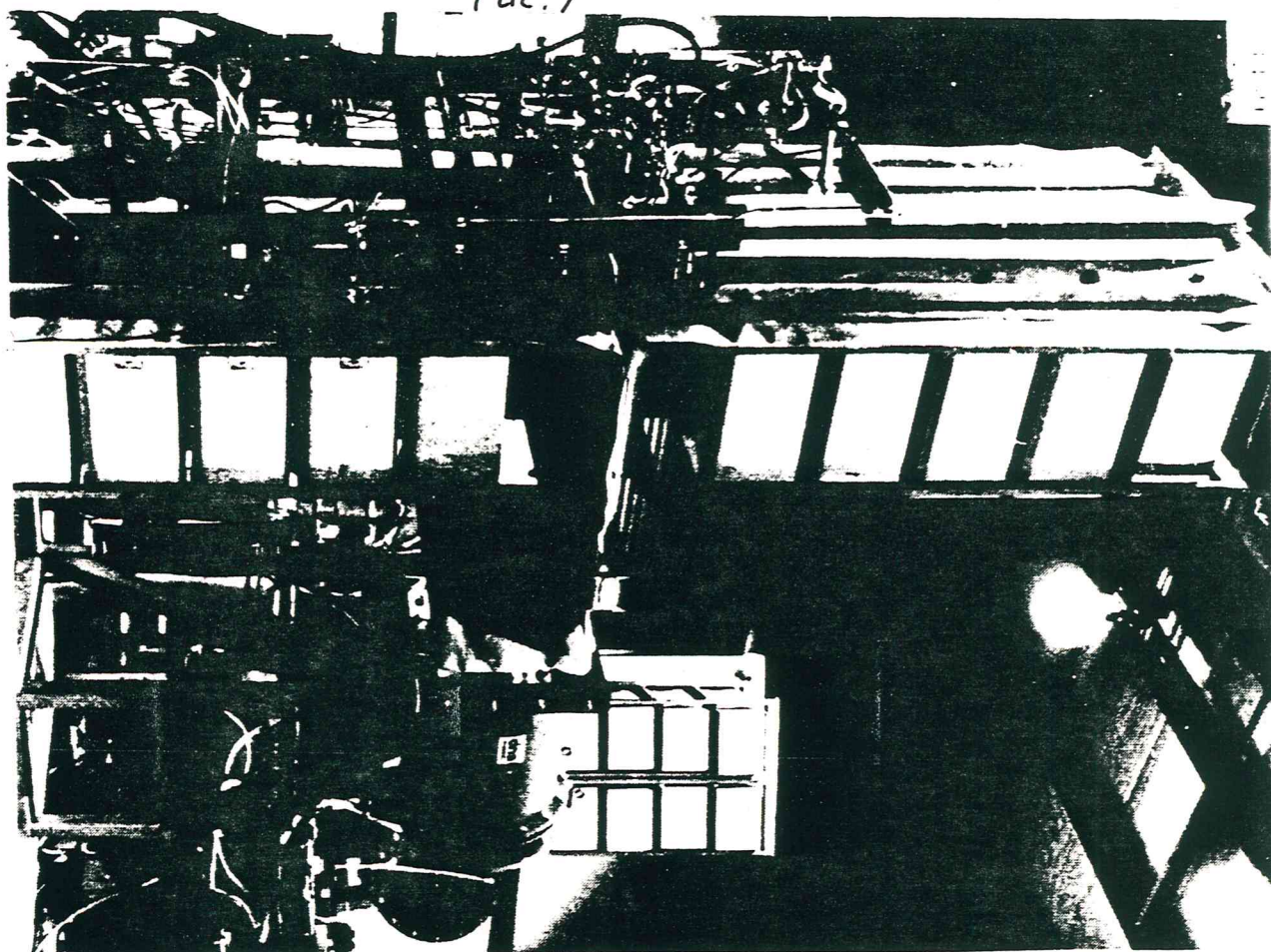


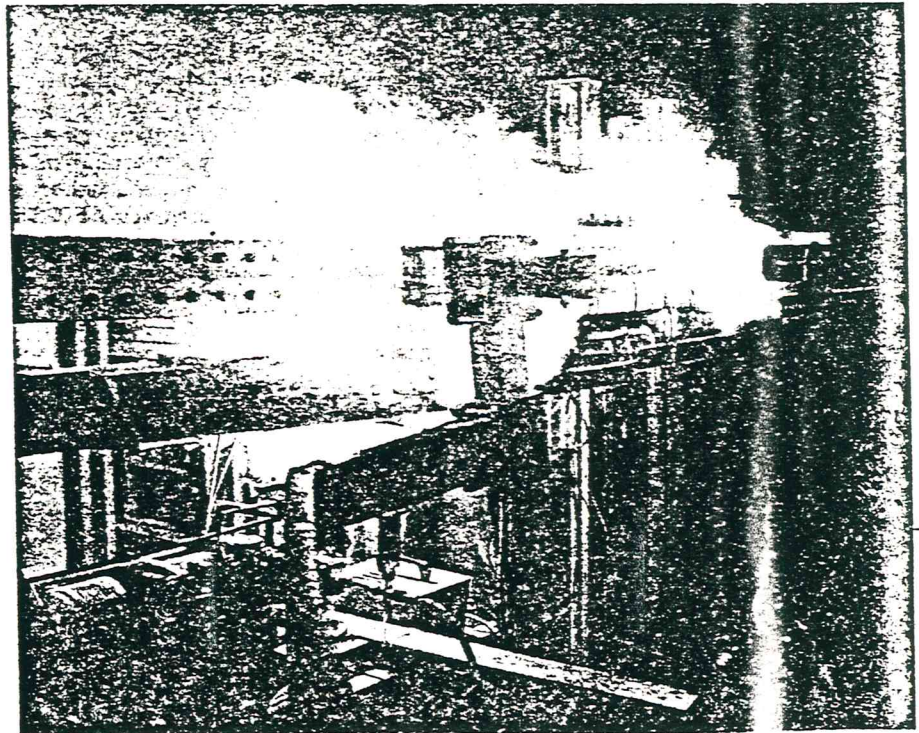
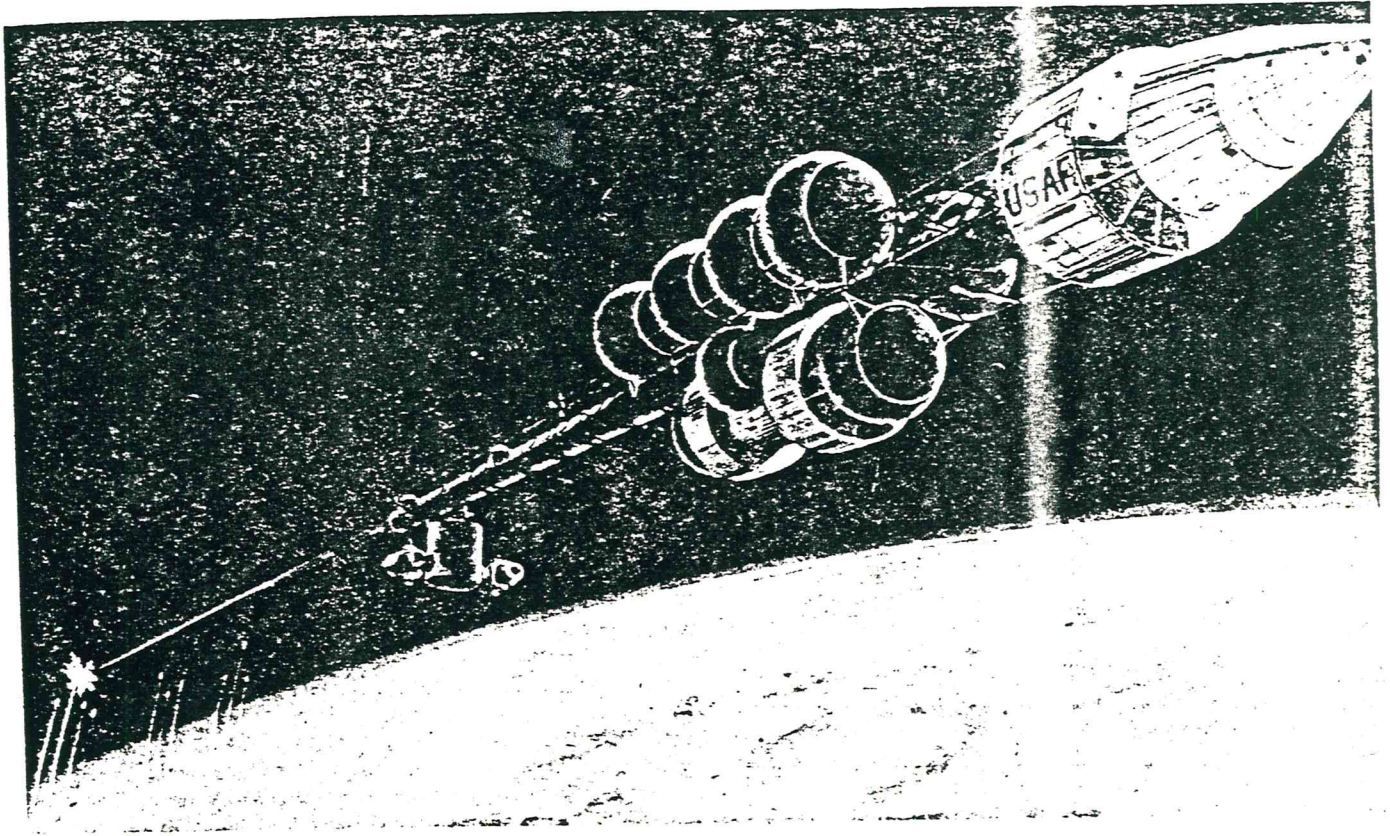
Рис. 6



Puc.7



Puc.8



Puc. 9

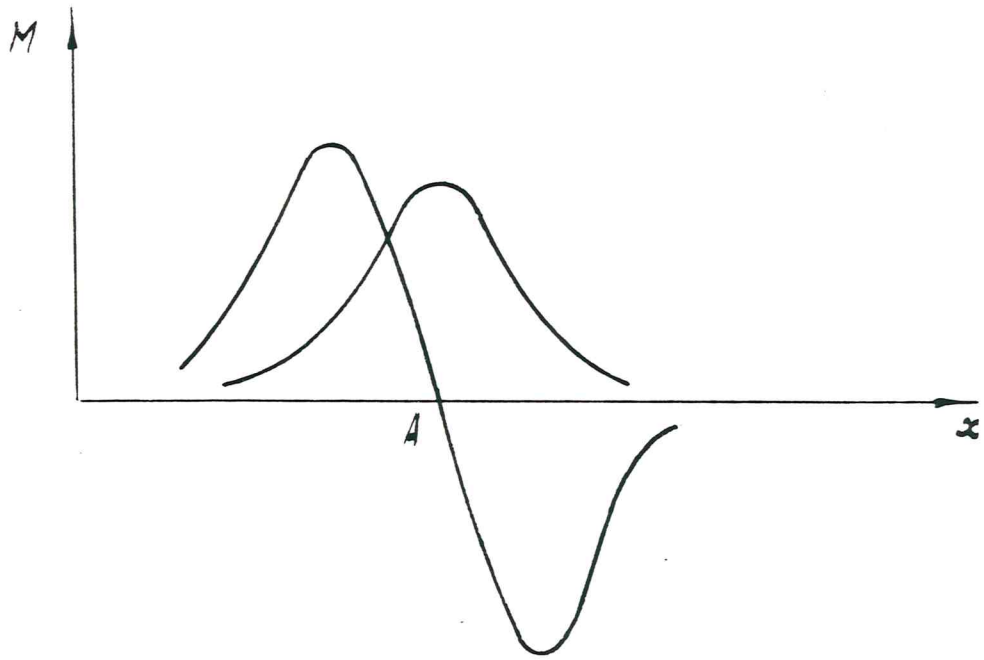


Рис. 10

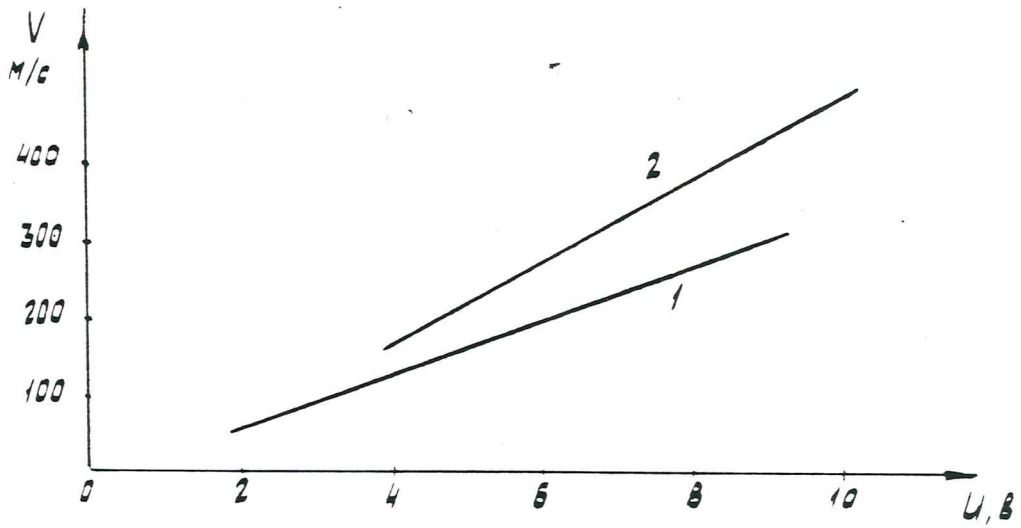


Рис. 11

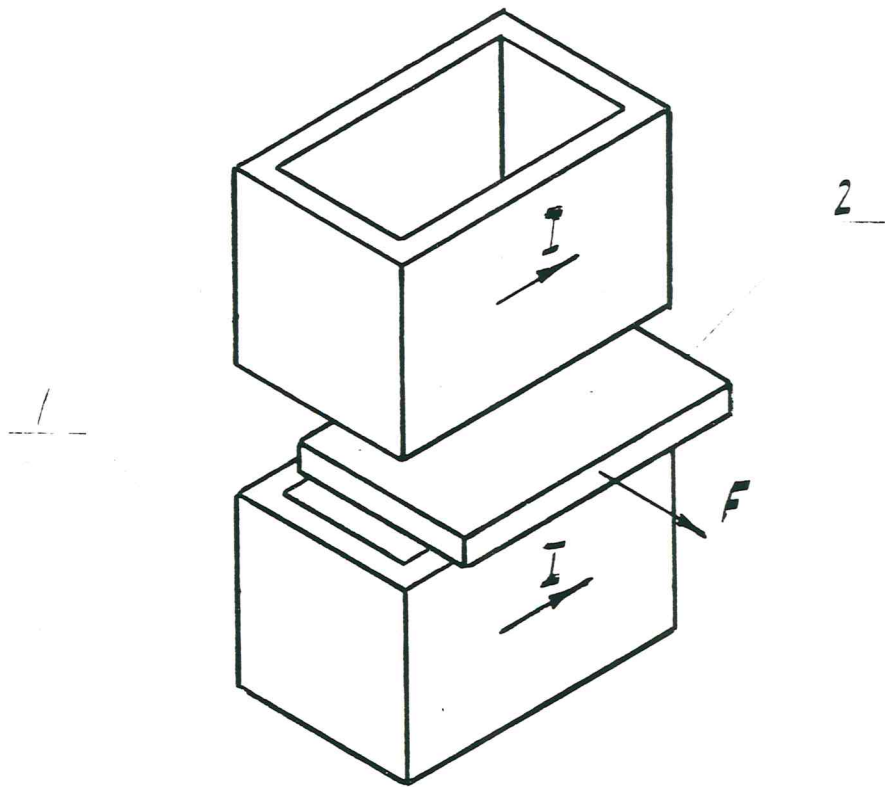


Рис. 12

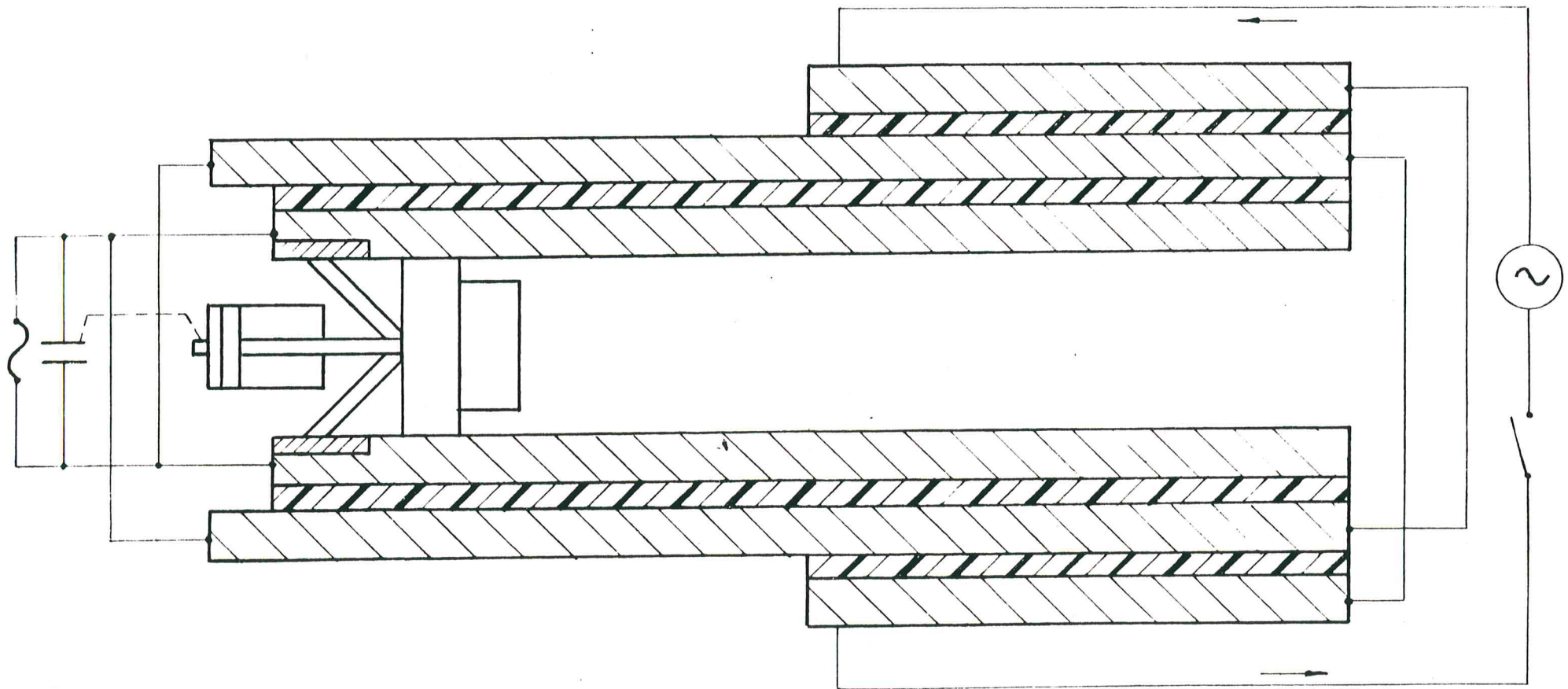


Рис. 13

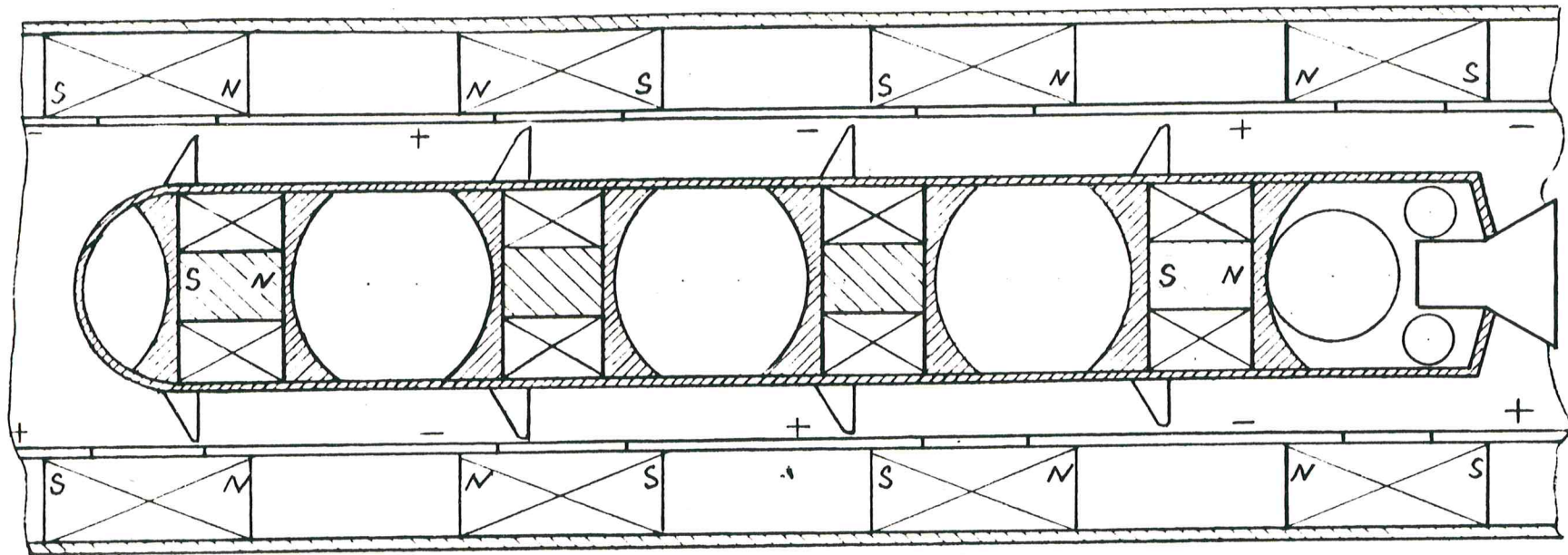


Рис. 15

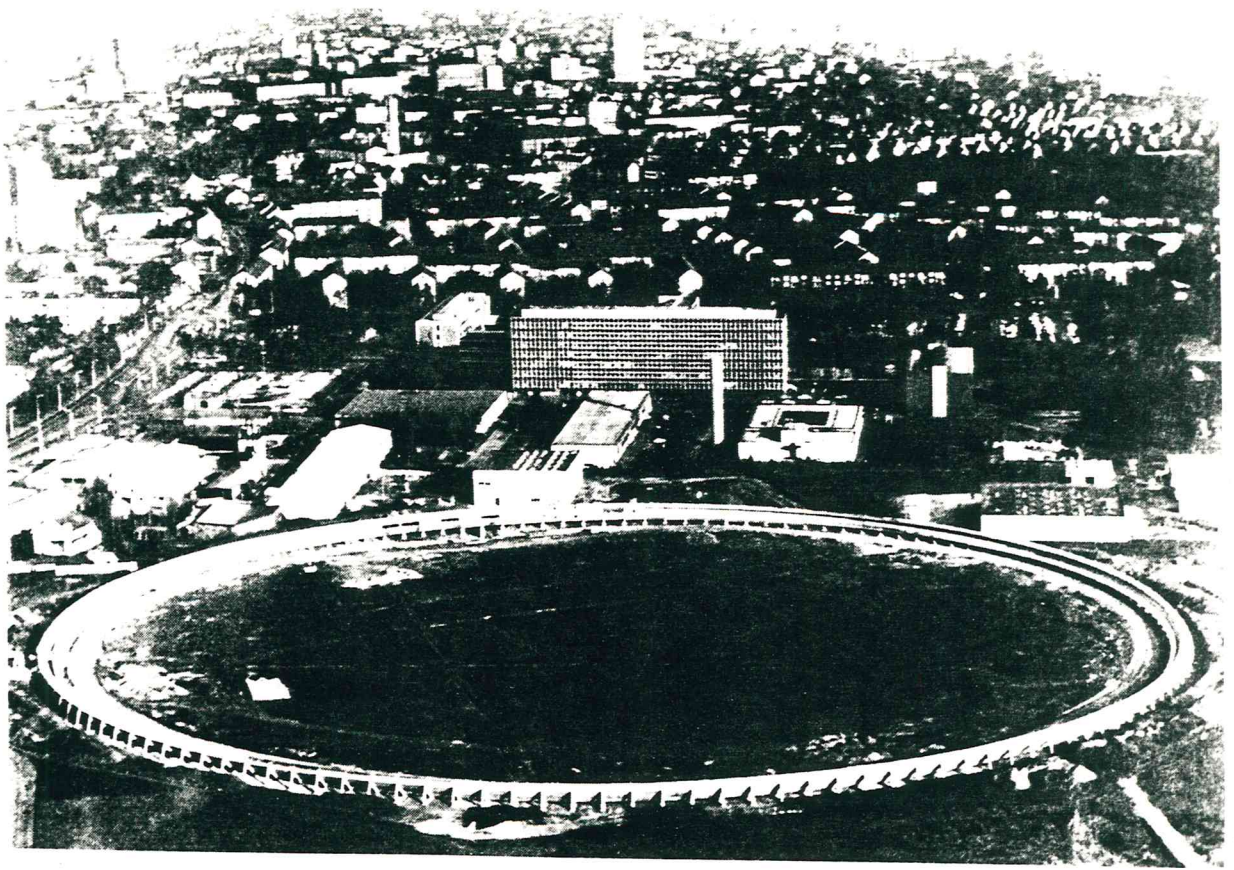


Рис. 16 Кольцевой путь длиной 880 м в Эрлангене

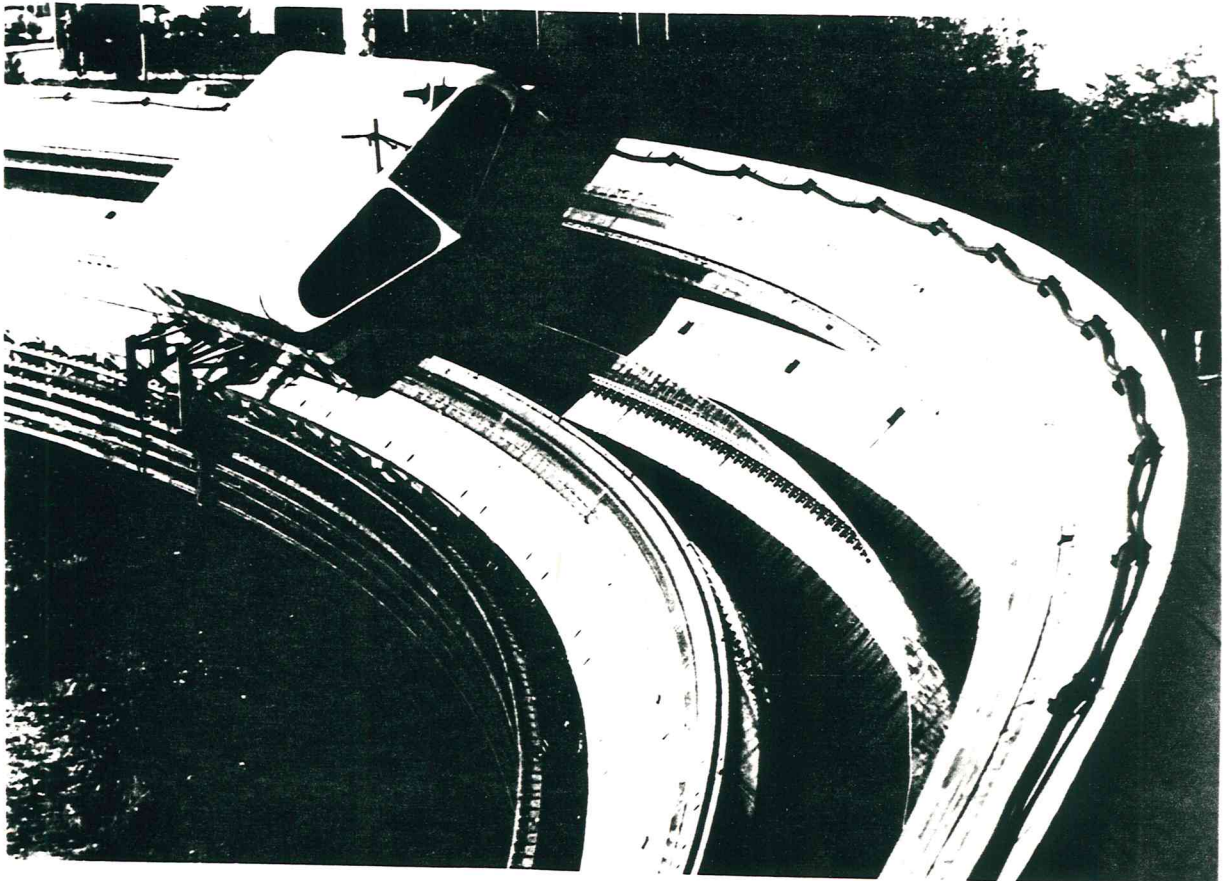


Рис. 17

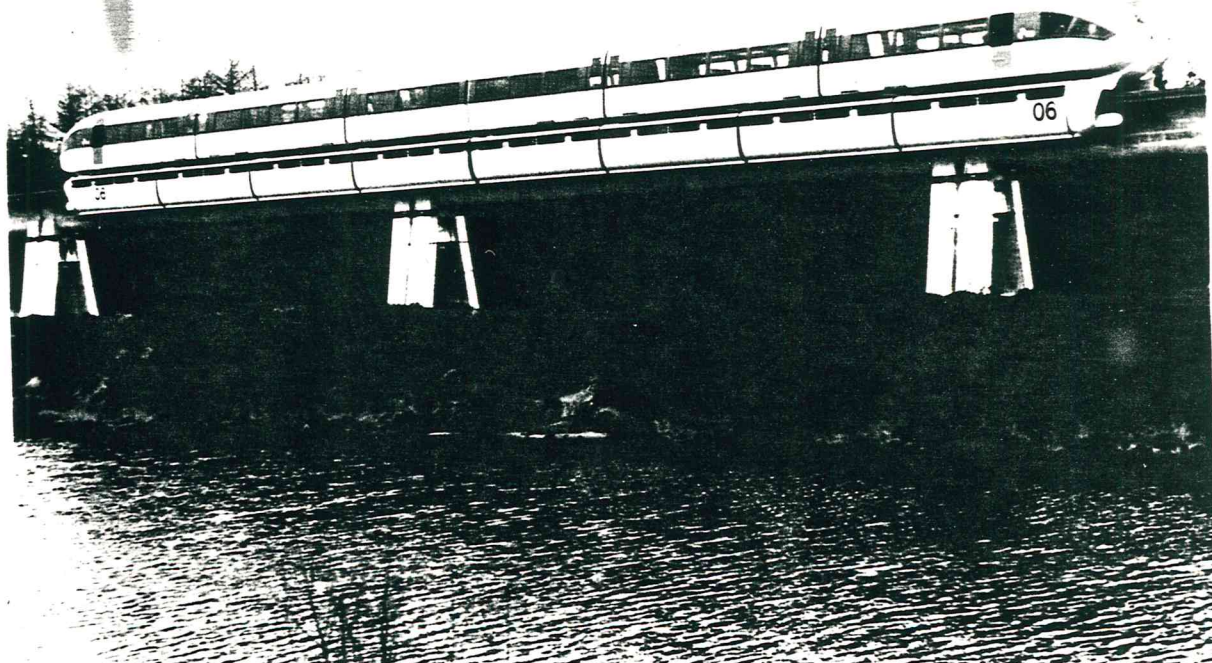
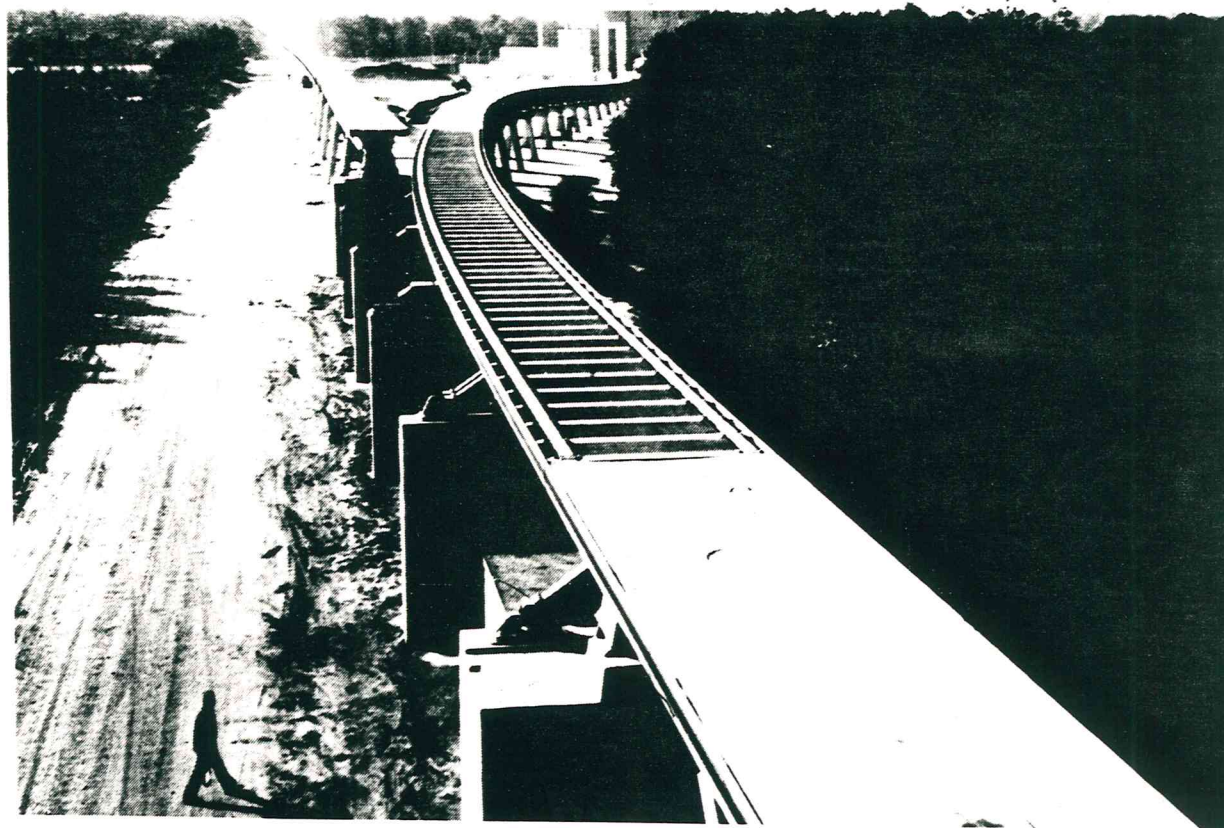
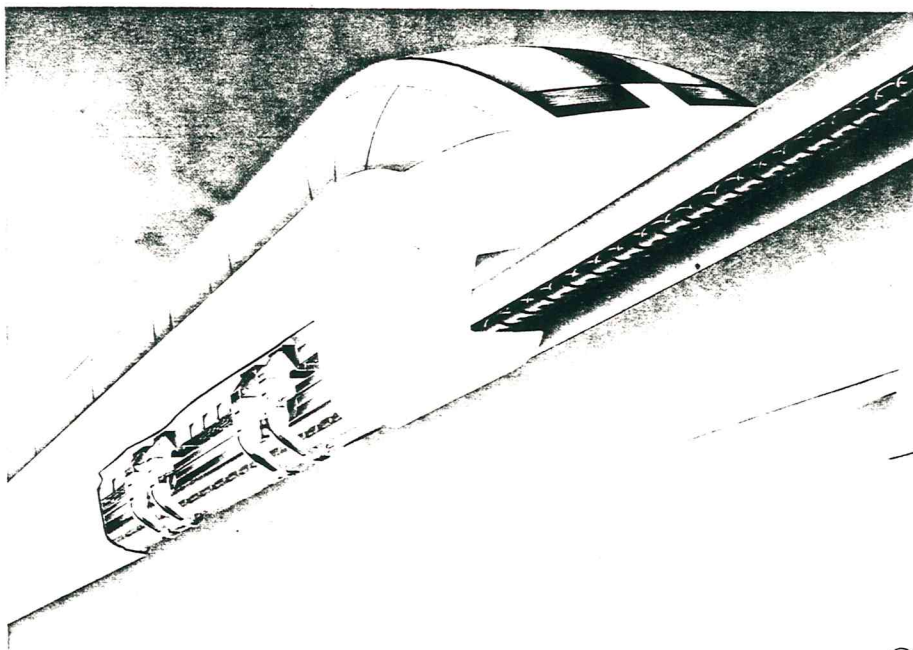
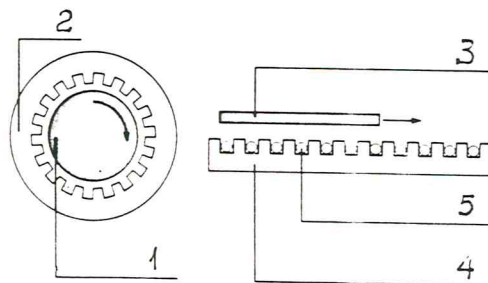


Рис.18 "Трансрапид-06" на испытательном полигоне в Эмсланде





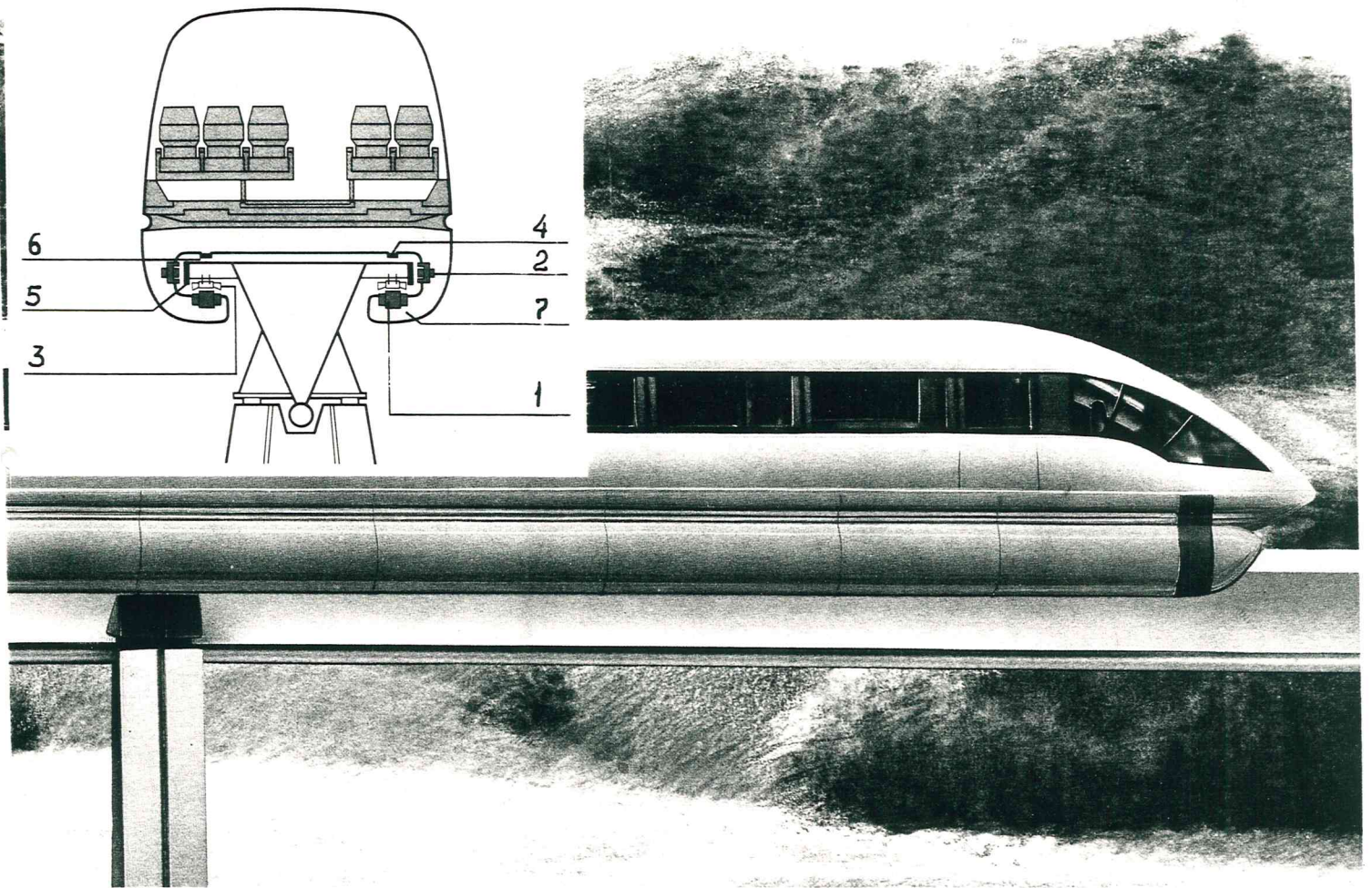
- 1 Ротор
- 2 Статор
- 3 Реактивная полоса
- 4 Статор
- 5 Смотка



Компоновка
линейного
привода

Рис. 19

Компоновочная схема вагона на магнитной подвеске



- 1 Магниты подвески
- 2 Магниты стабилизации
- 3 Ферромагнитный рельс-длинный статор
- 4 Споры безопасности
- 5 Ферромагнитный рельс
- 6 Опорная поверхность
- 7 Корпус вагона

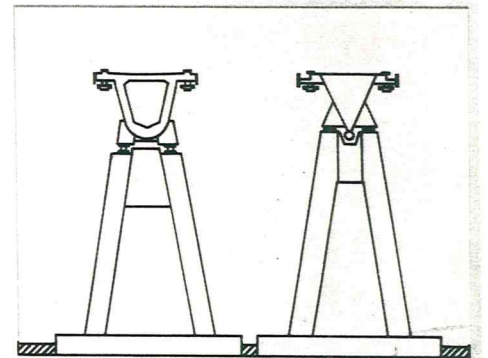


Рис. 20

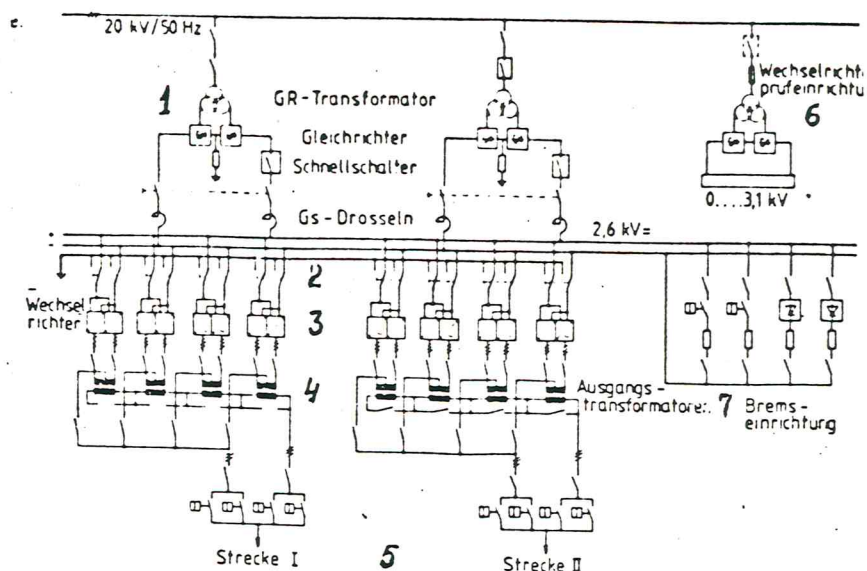


Рис. 21 Схема преобразовательной подстанции

I – выпрямительные блоки; 2 – промежуточная цепь постоянного тока; 3 – инверторы; 4 – выходные трансформаторы; 5 – магистральные кабели; 6 – вспомогательный выпрямитель; 7 – тормозные резисторы

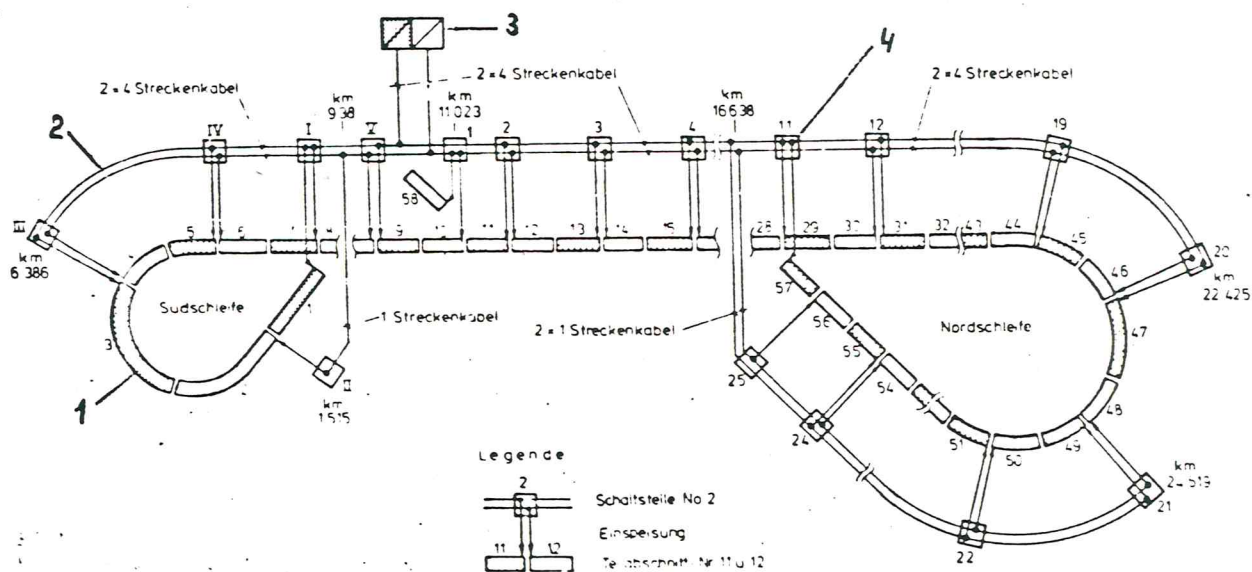
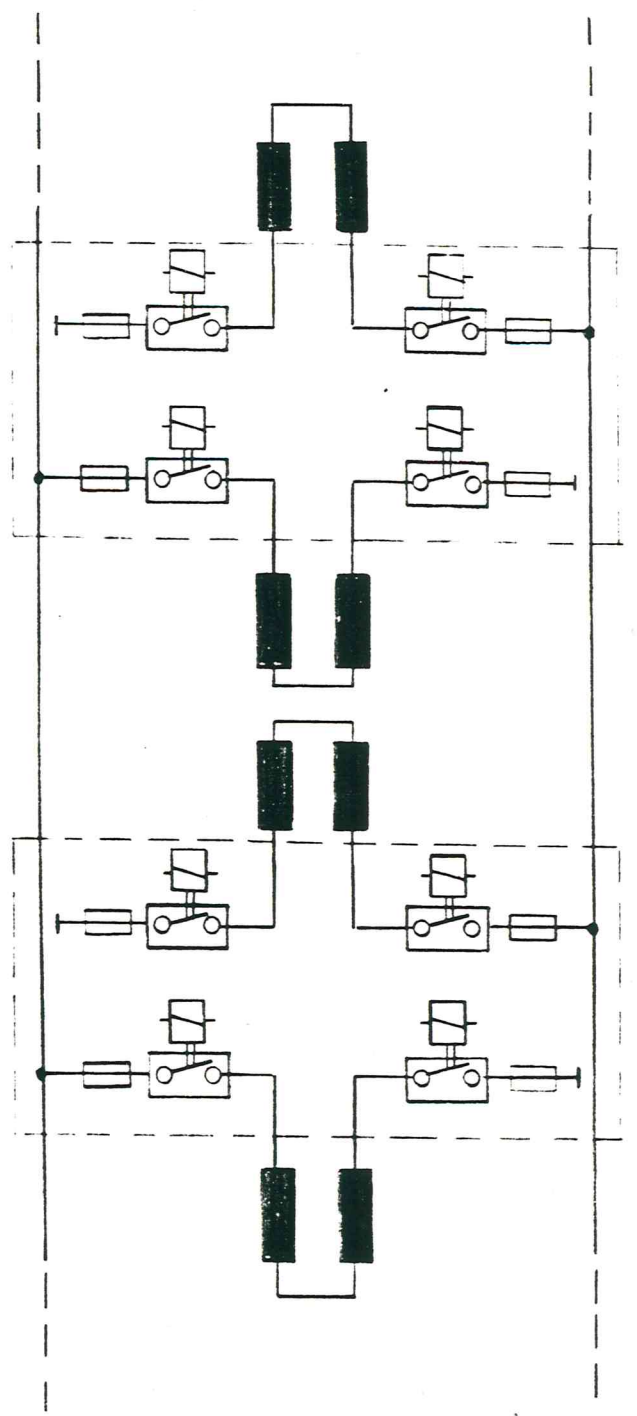


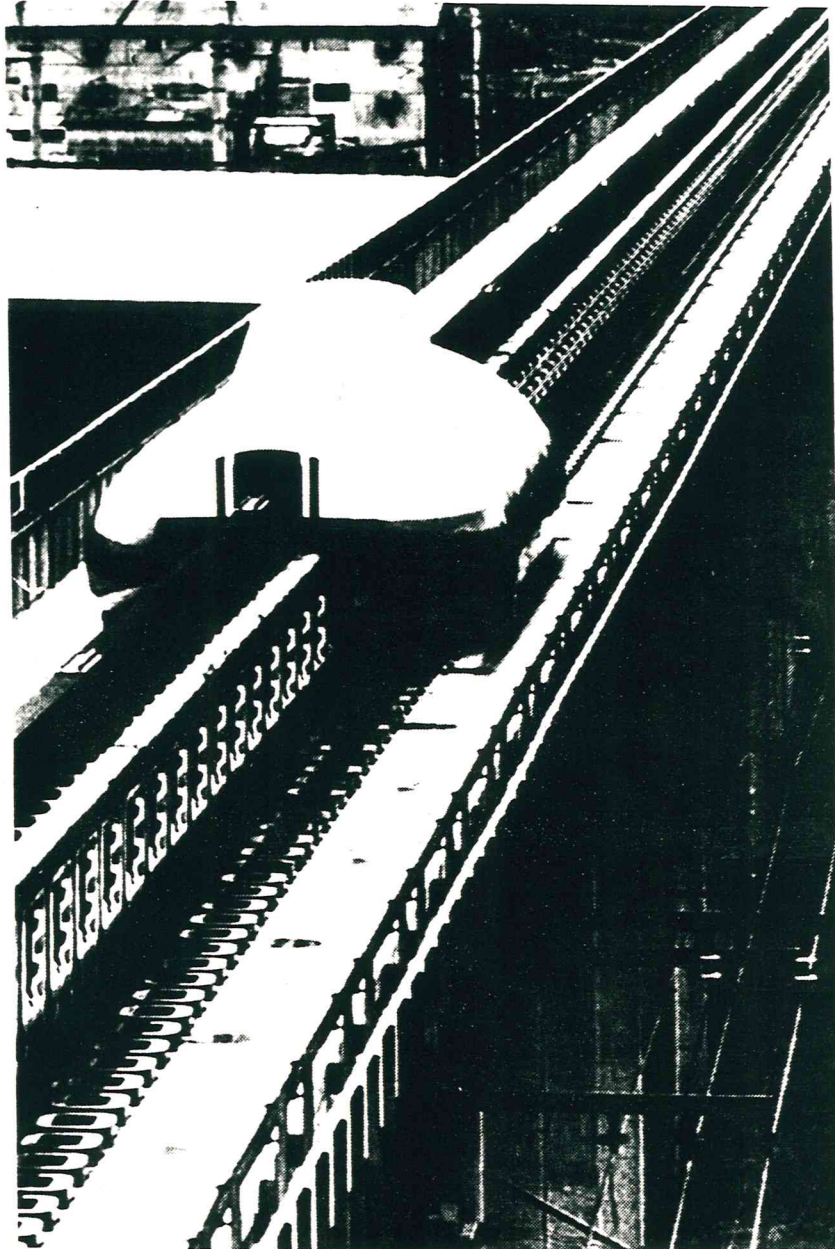
Рис. 22. Схема питания секций обмотки статора линейного электродвигателя

I – секция обмотки статора; 2 – магистральные кабели; 3 – инверторные группы преобразовательной подстанции; 4 – переключательная подстанция

2 3 4 5



PUC, 23



ML 500 на испытательном участке В Мядзэки

Рис. 24

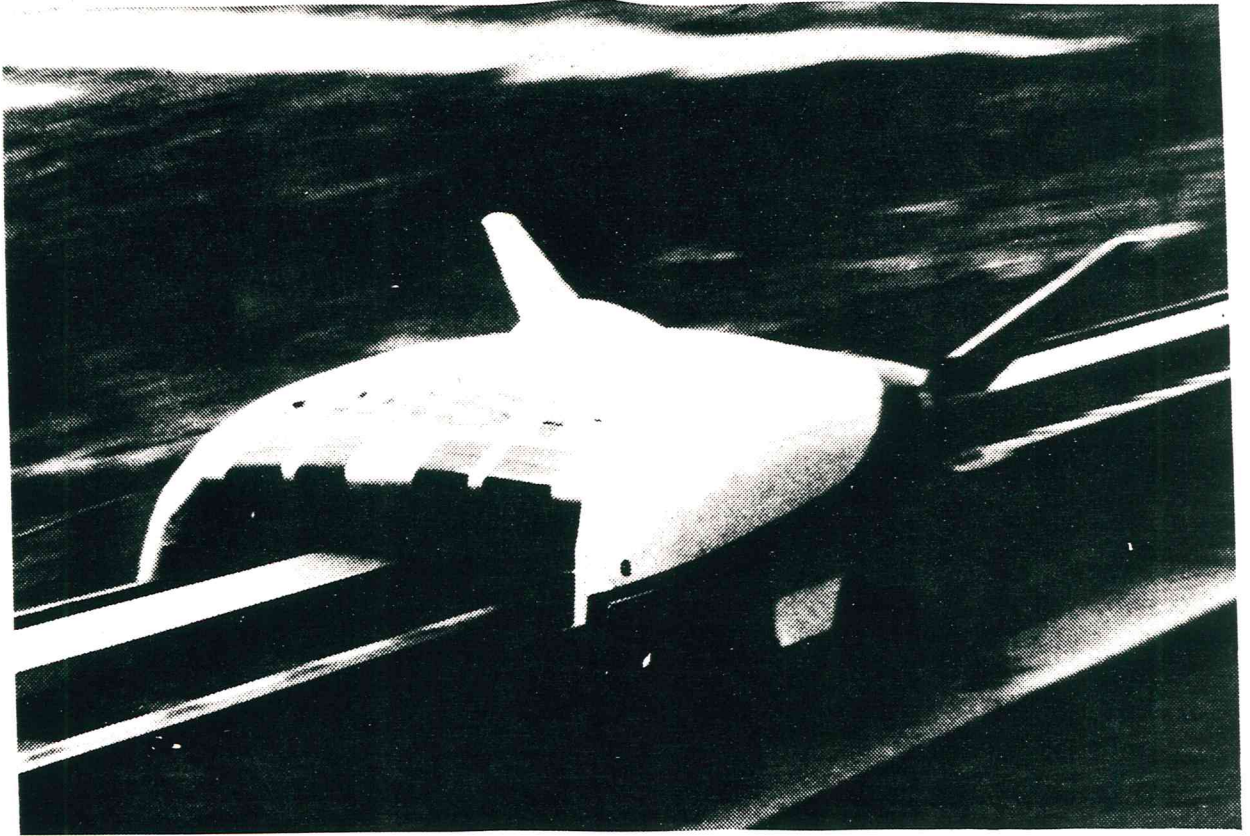


Рис 25 HSST 01 в Миядзаки

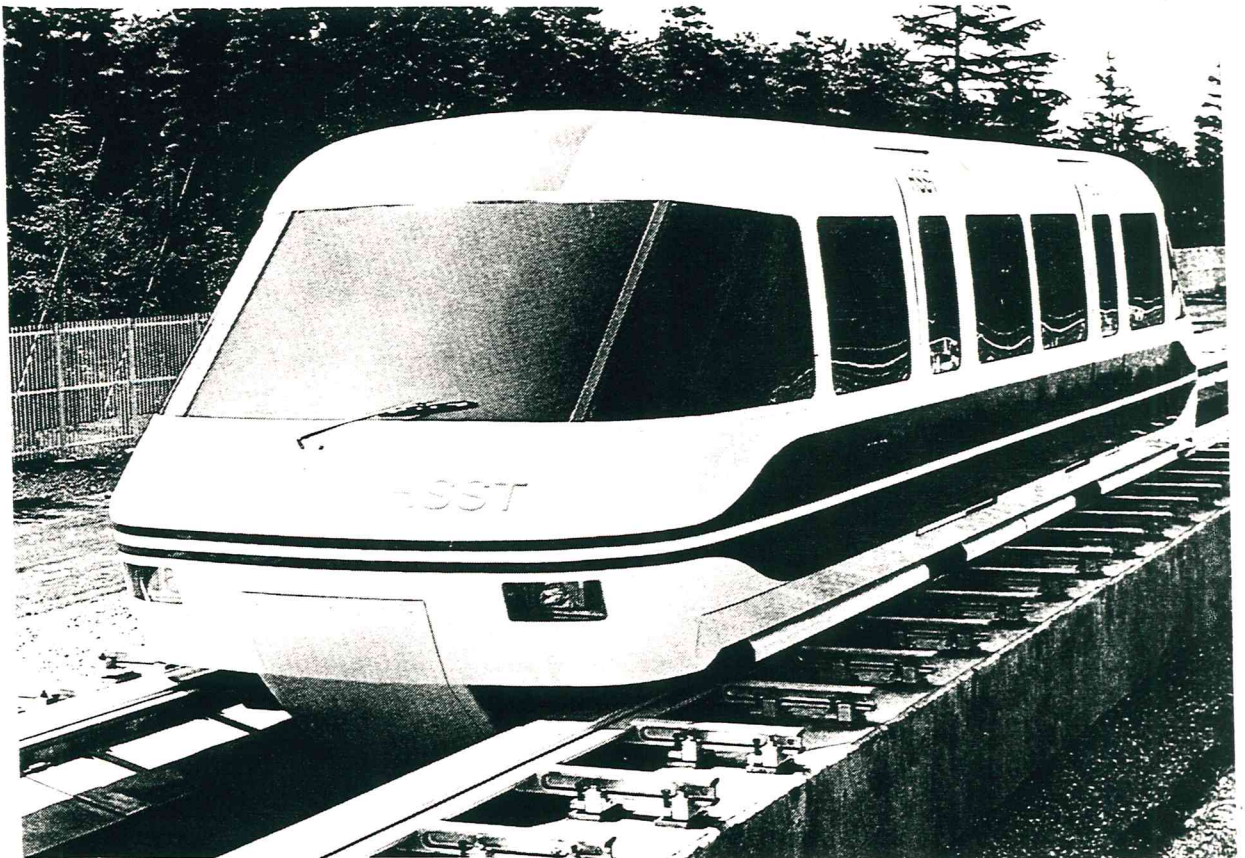


Рис. 26 транспортная система HSST03

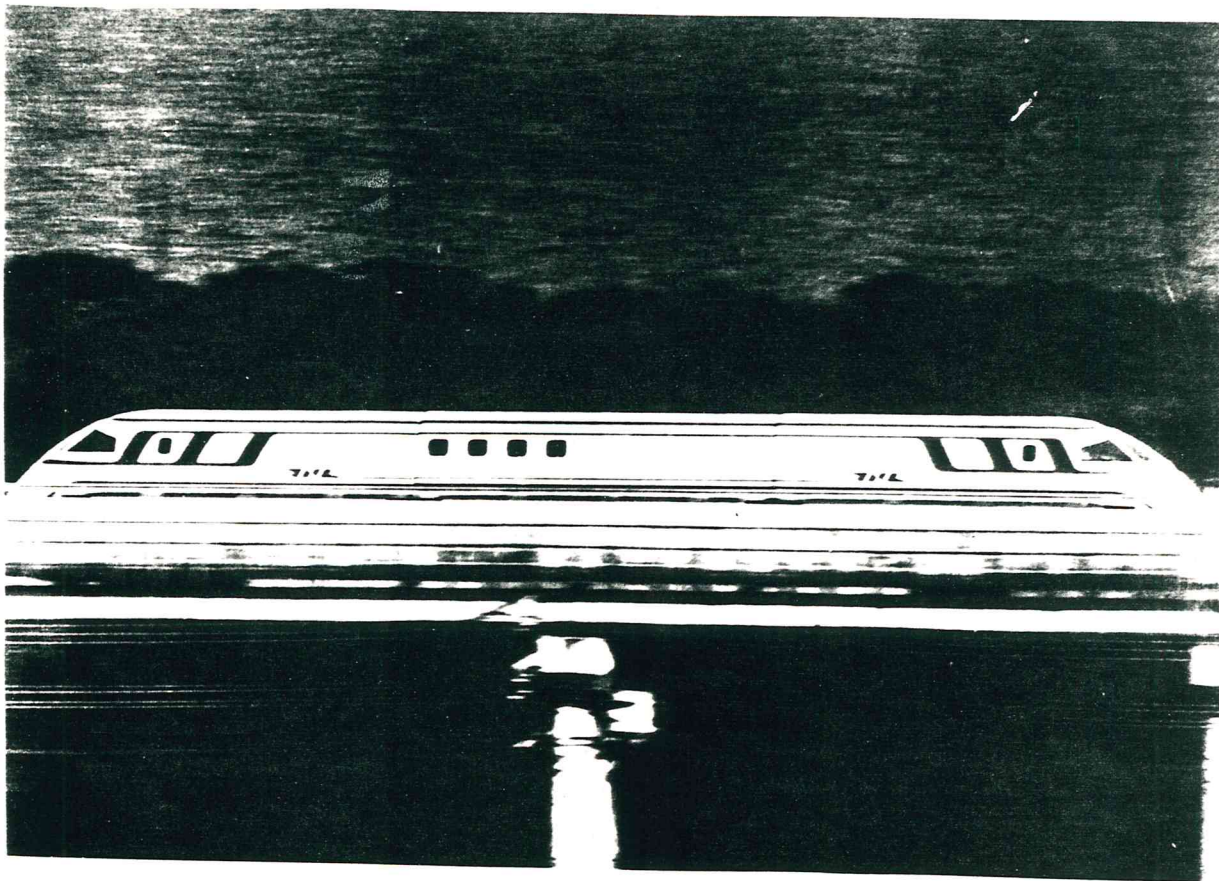
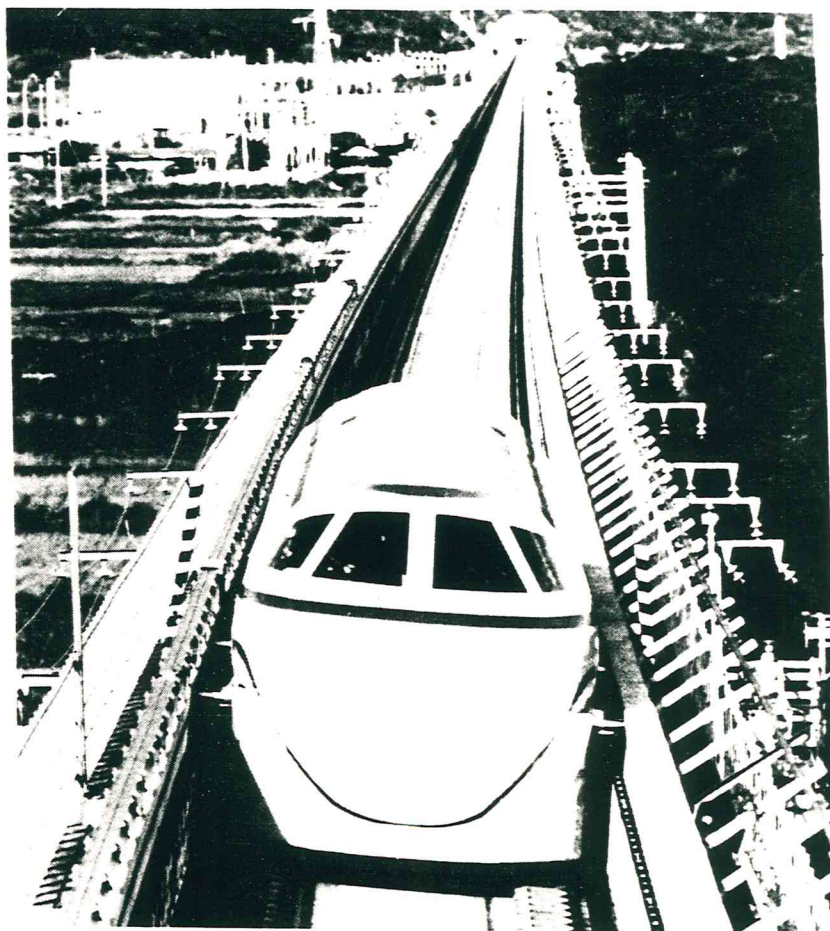


Рис.27 MLU-001 в Миядзаки



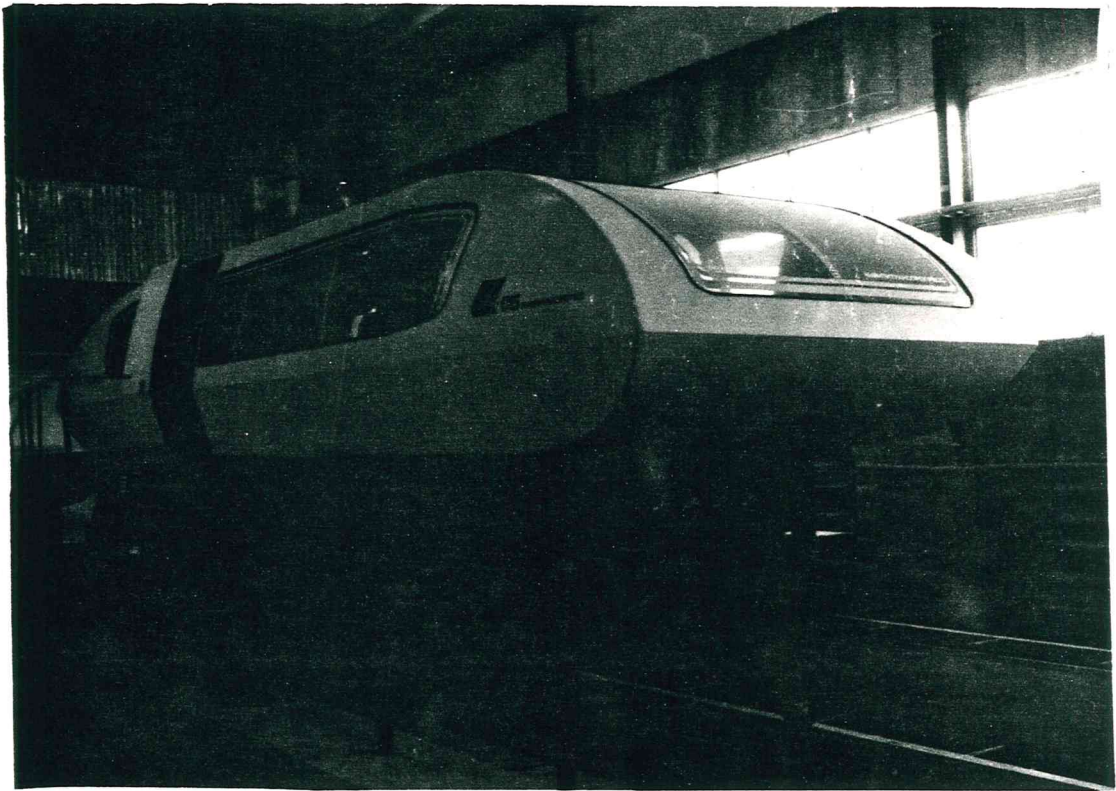


Рис. 28 Вагон ТП-05 на подмосковном полигоне

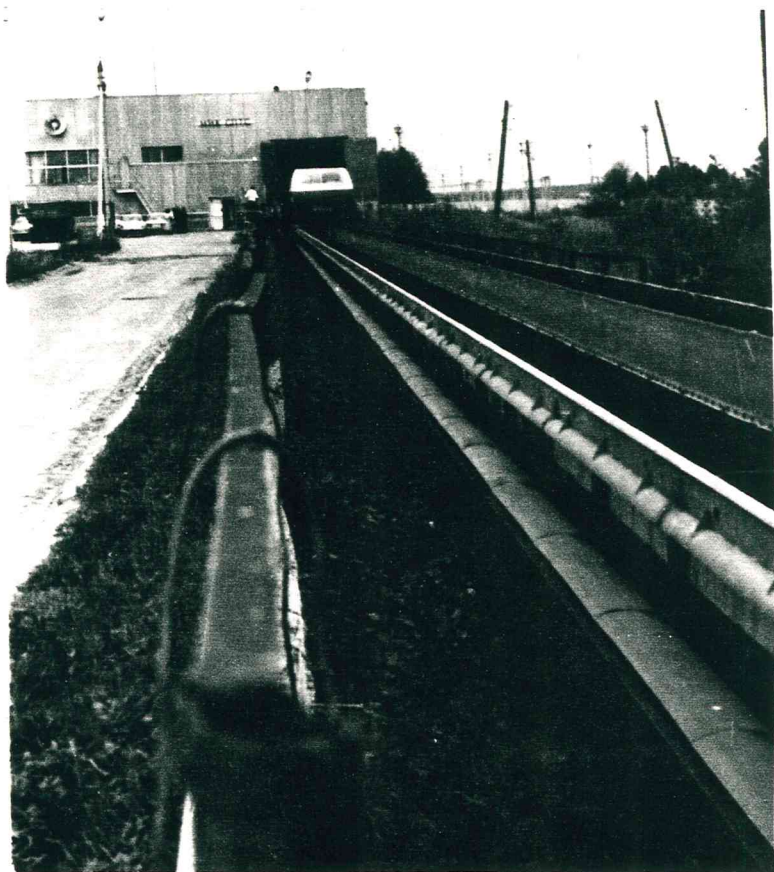


Рис. 29 Прямолинейный путь подмосковного полигона

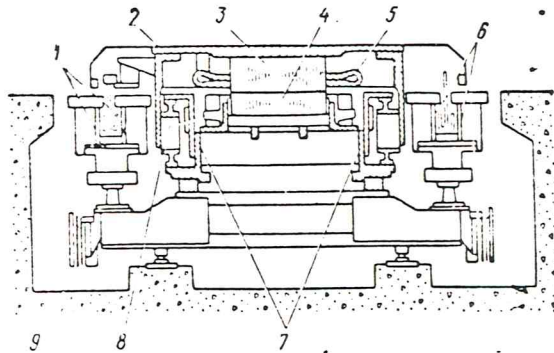


Рис. 30 Поперечный разрез двигателя для электрокатапультирования:

1 — изолированный коллекторный рельс-фаза 1; 2 — щеточная тележка; 3 — сердечник первичной обмотки; 4 — сердечник вторичной обмотки; 5 — первичная обмотка; 6 — изолированный коллекторный рельс-фаза 3; 7 — заземленный коллекторный рельс-фаза 2; 8 — вторичная обмотка; 9 — фидерная шина

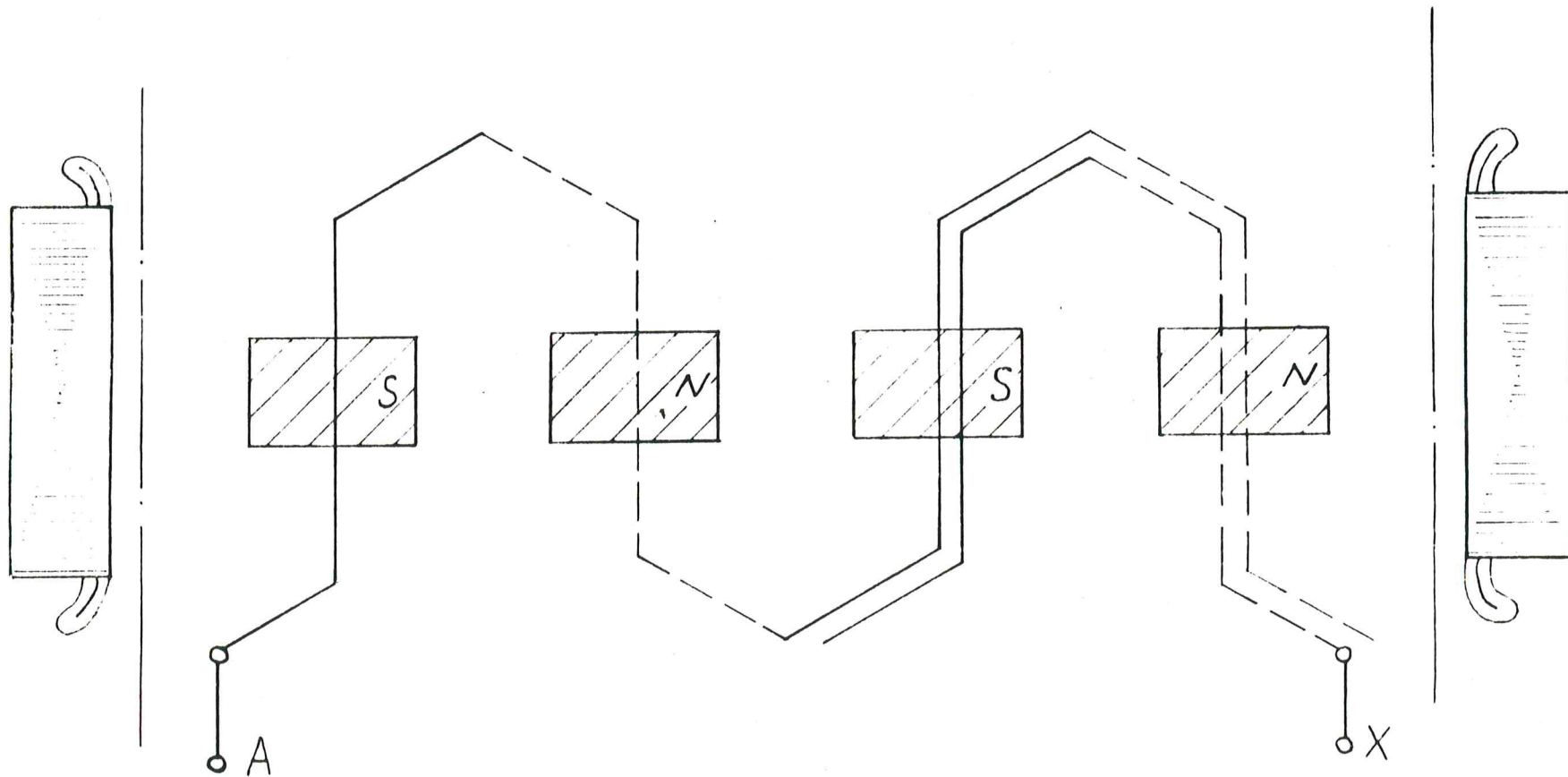


Рис. 31

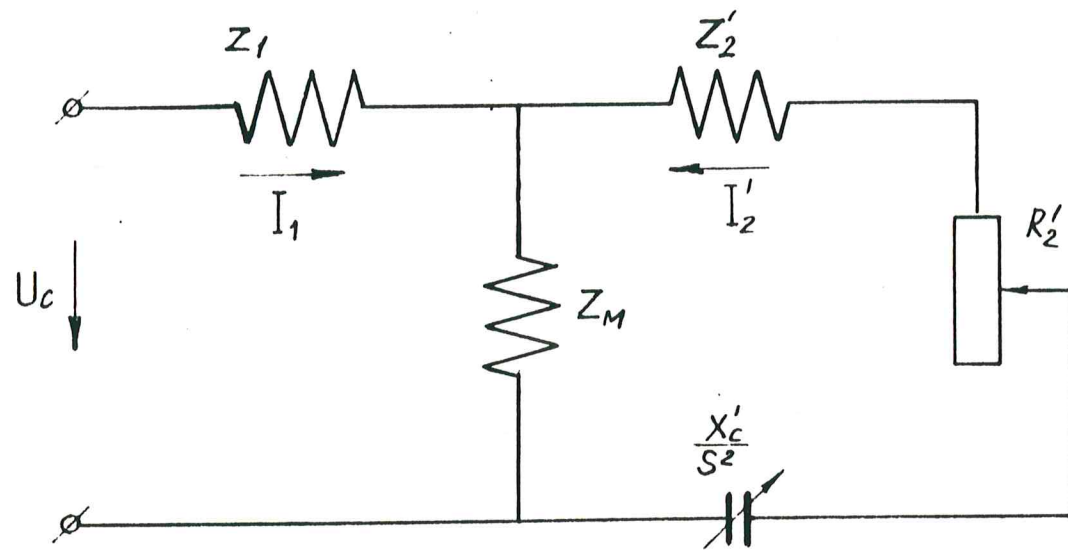


Рис. 32

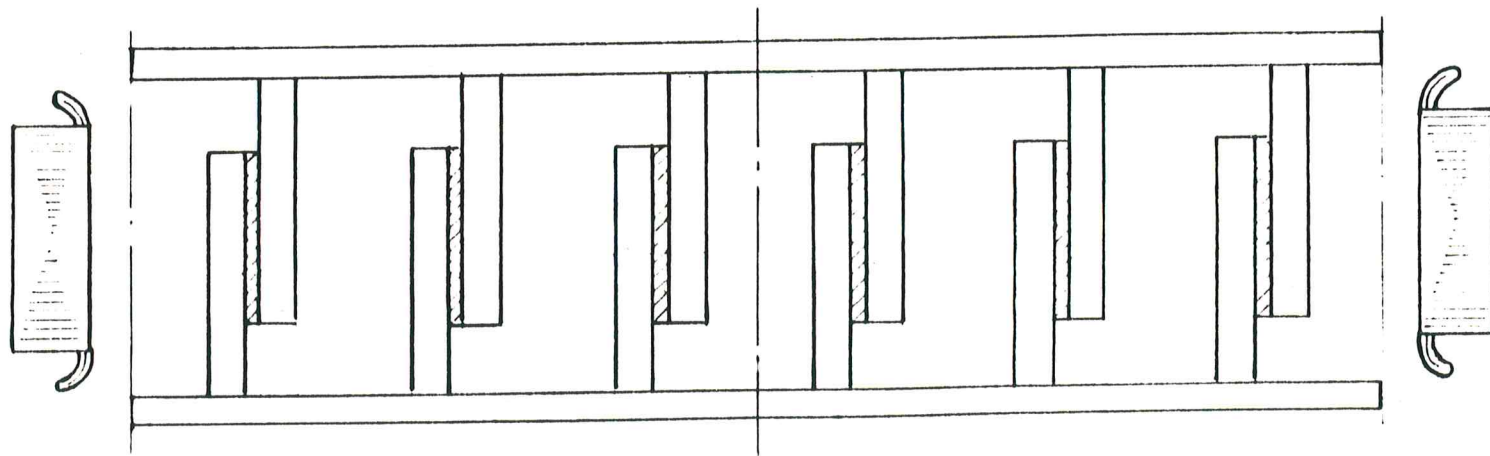


Рис. 33

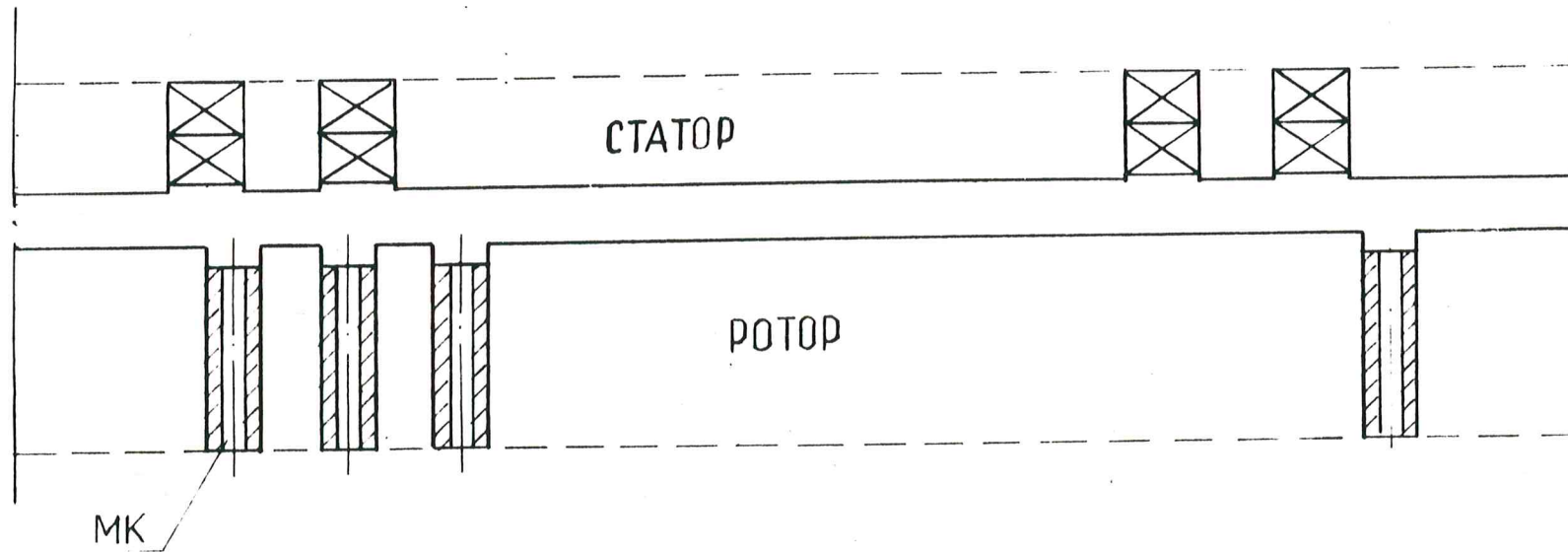


Рис. 34

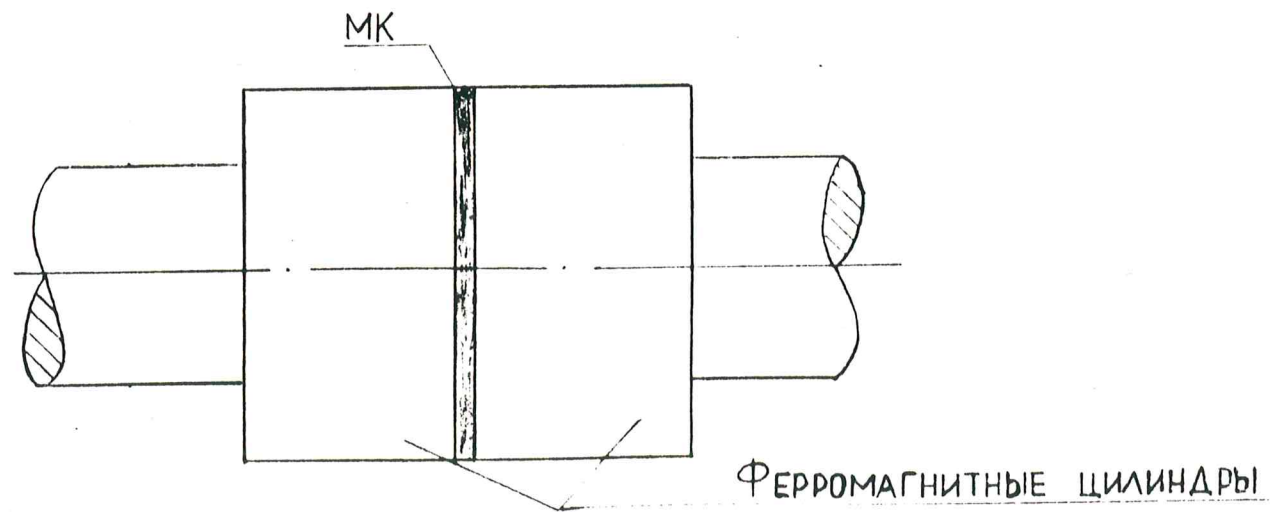


Рис. 35

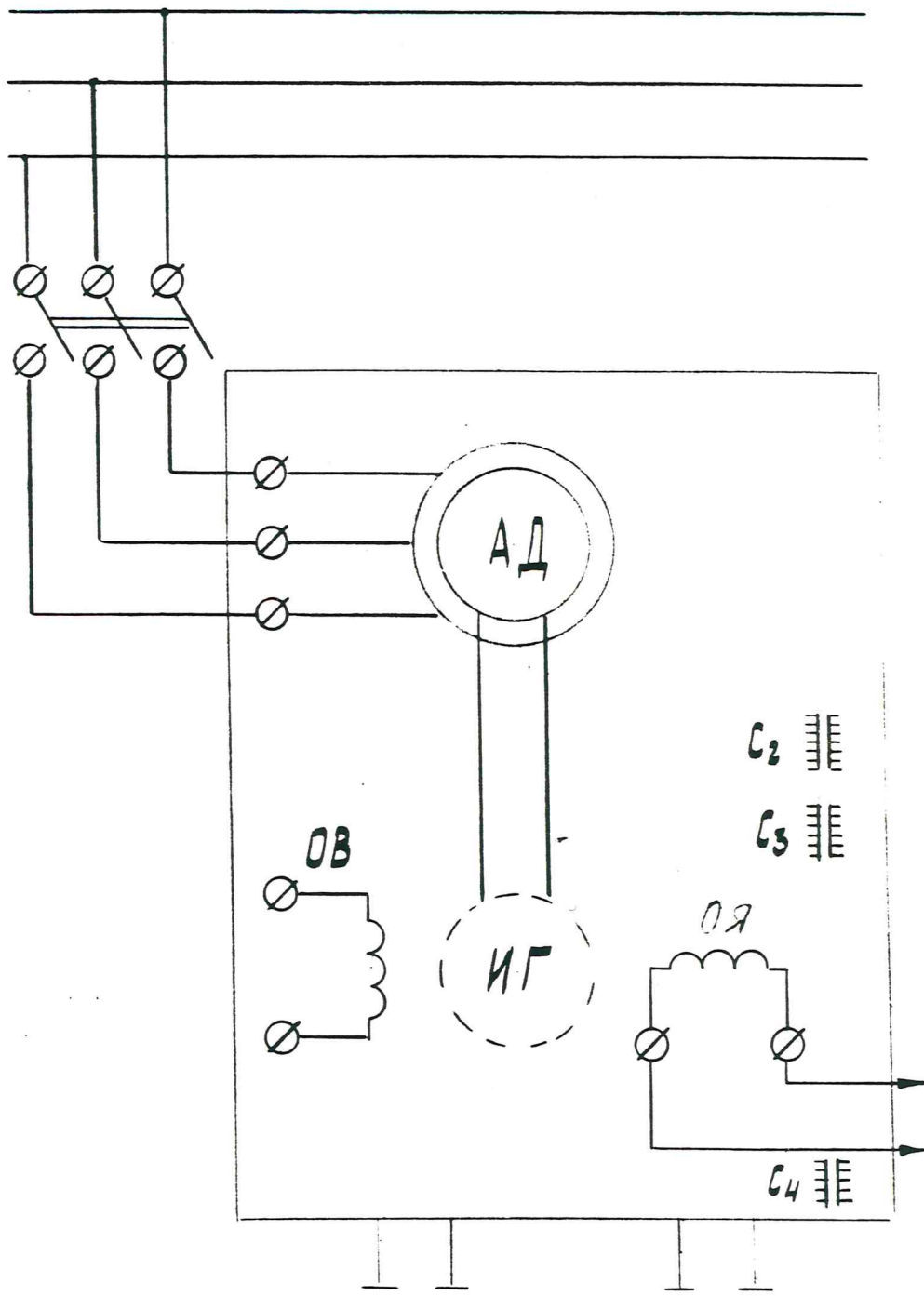


Рис. 36

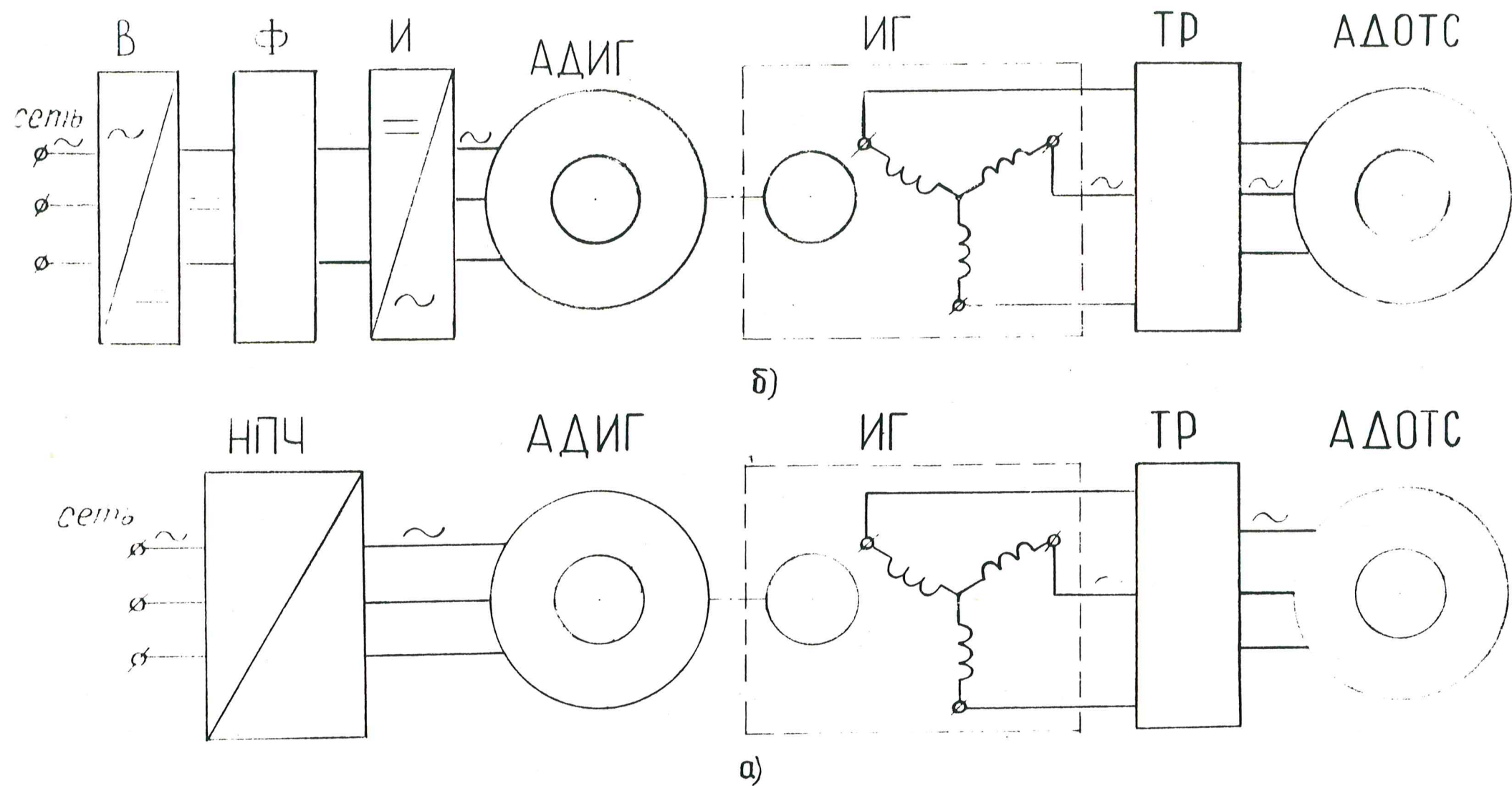


Рис. 37

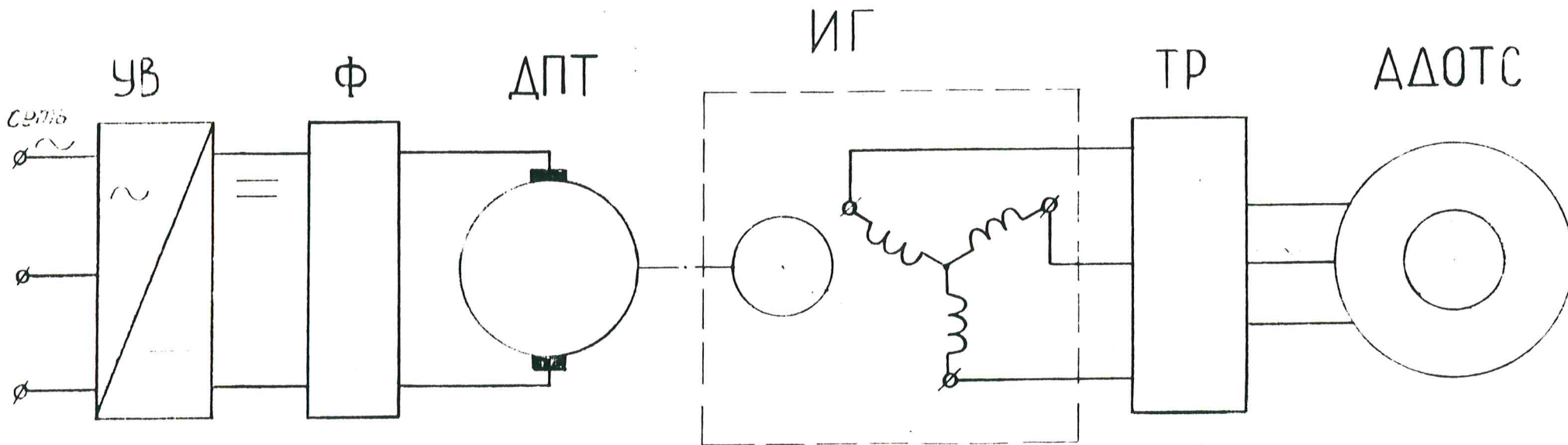
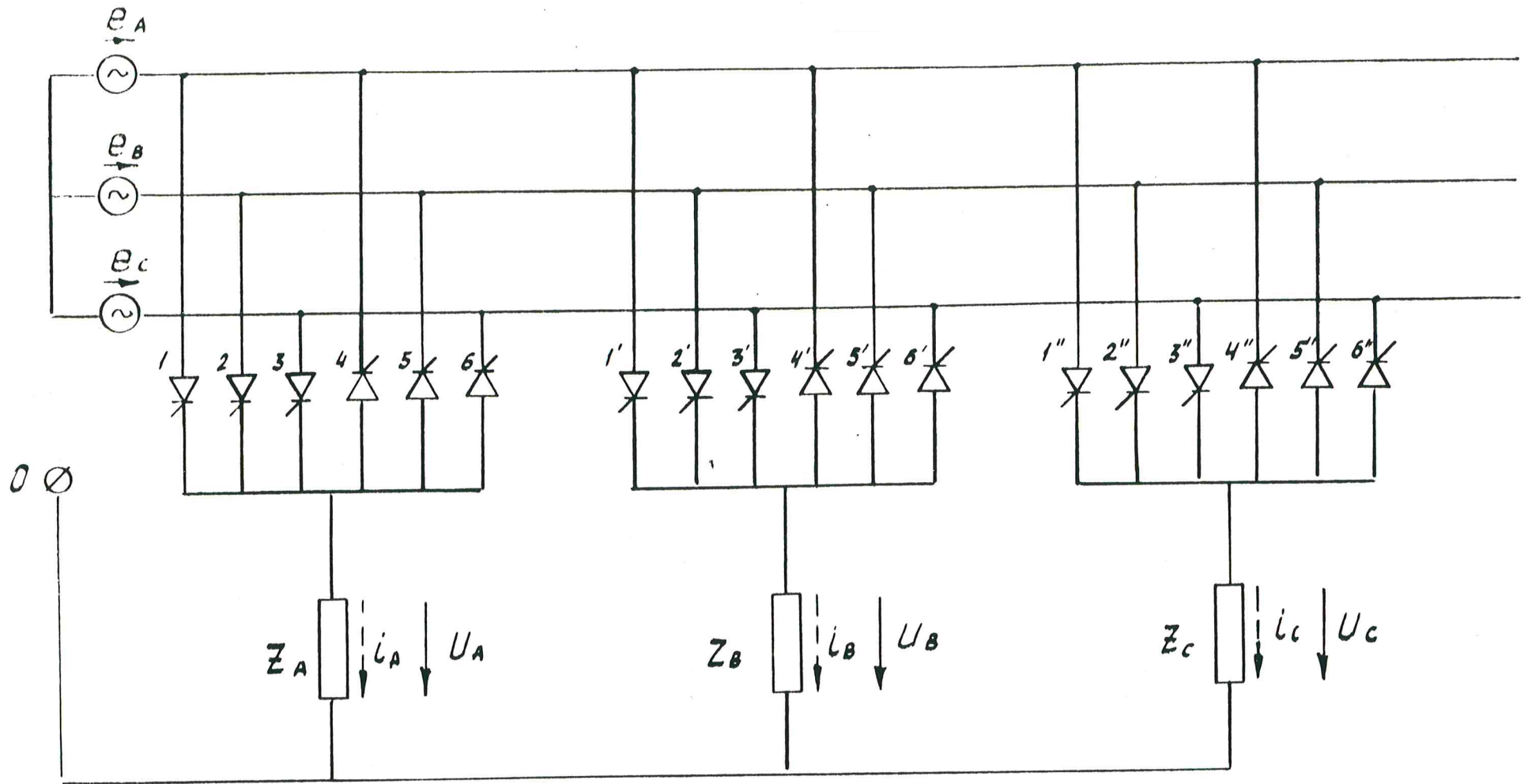


Рис. 38



Puc. 39

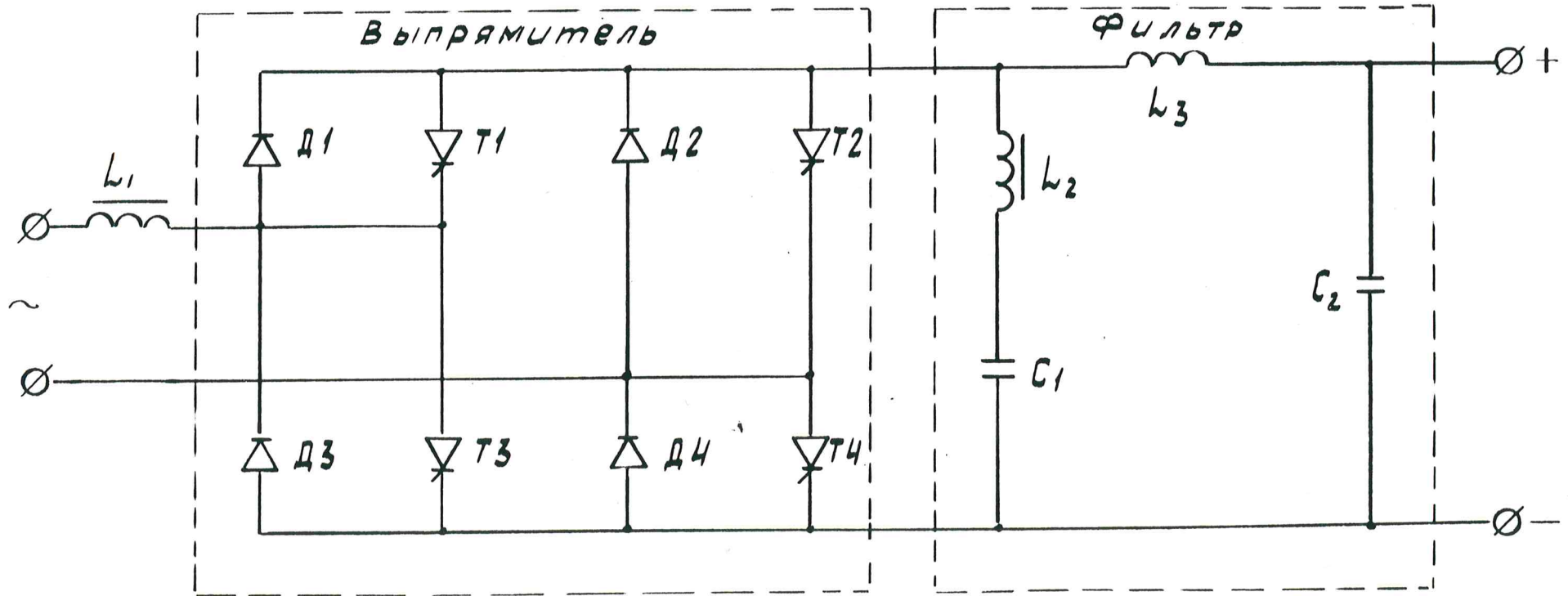


Рис. 40

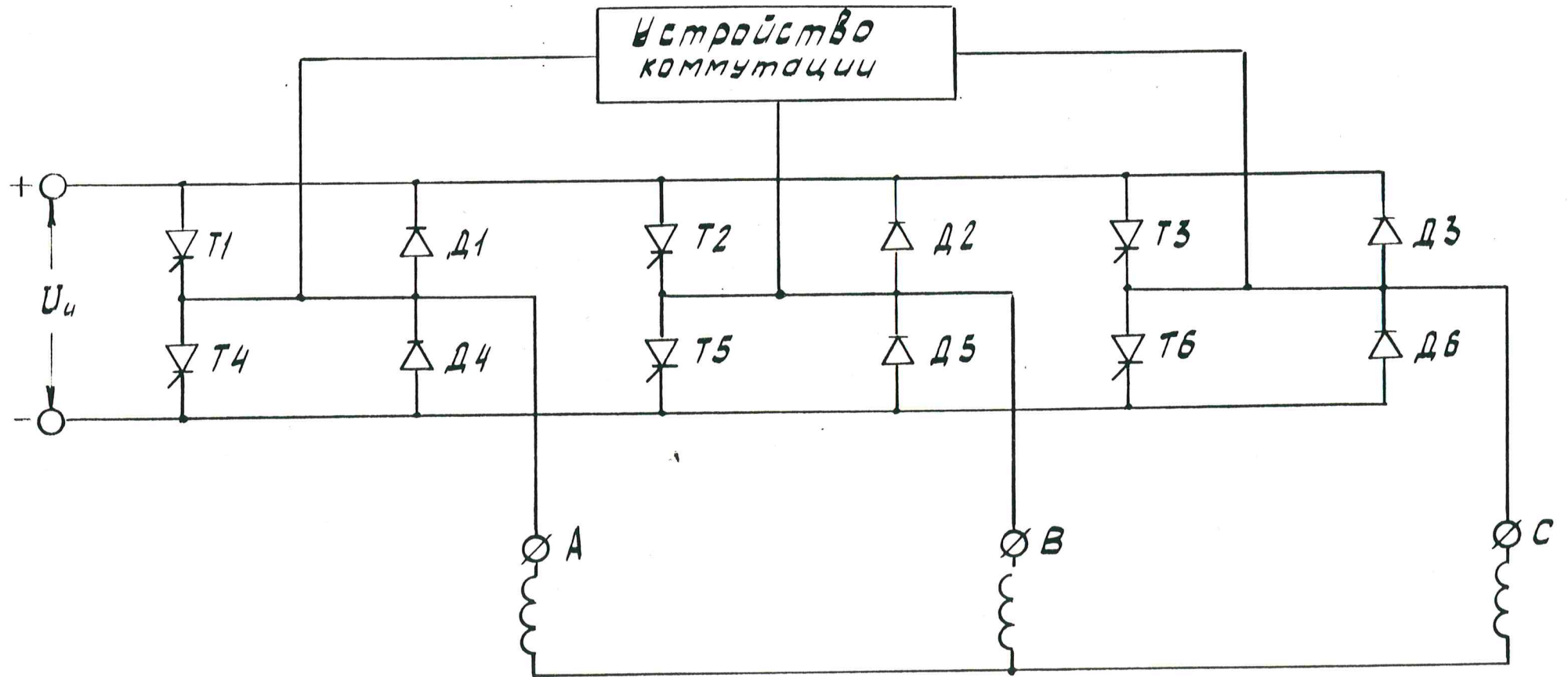


Рис. 41

Преобразователь частоты электроваза ВЛВДА-751

К управляемому выпрямителю

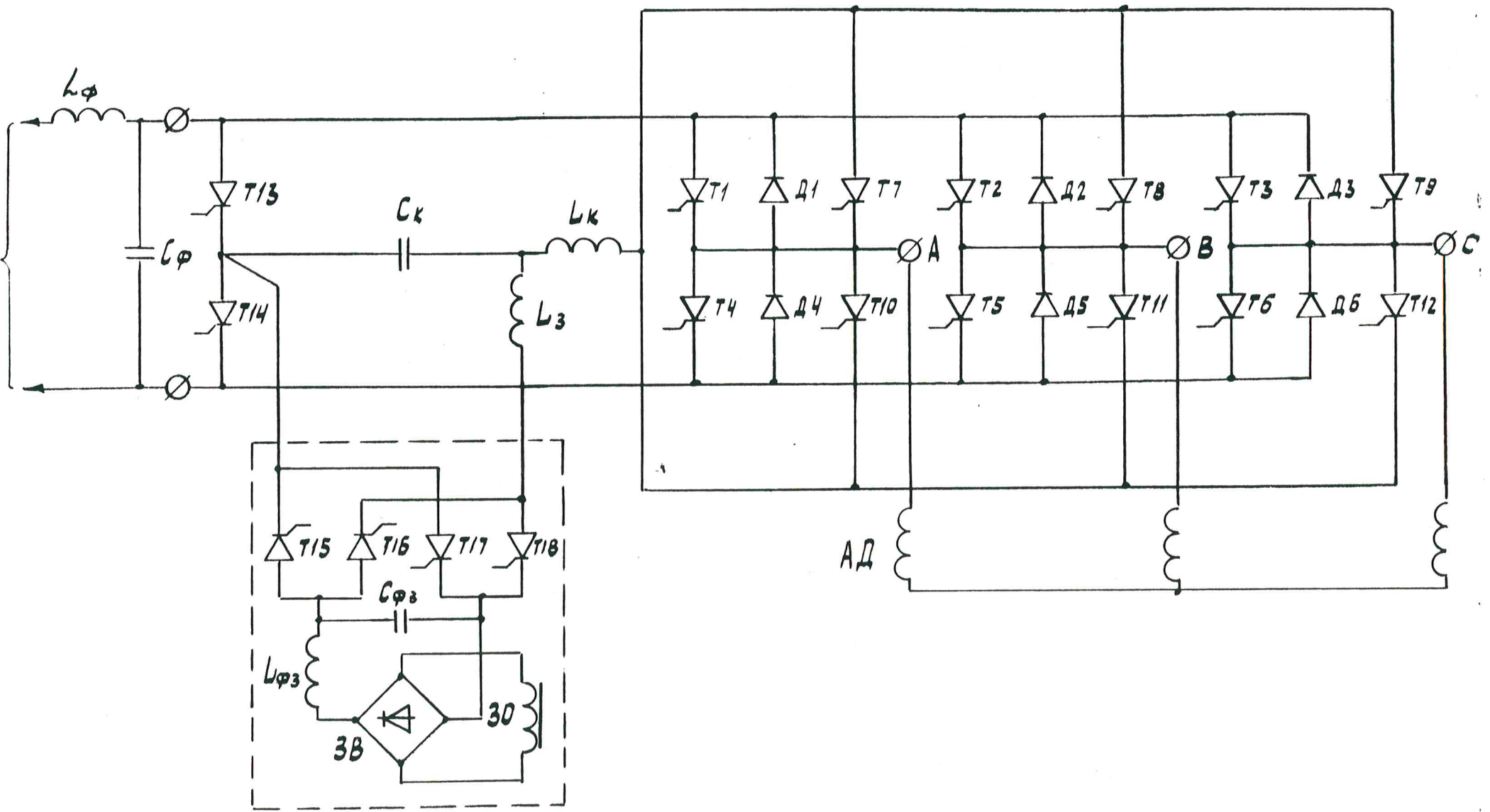


Рис. 42

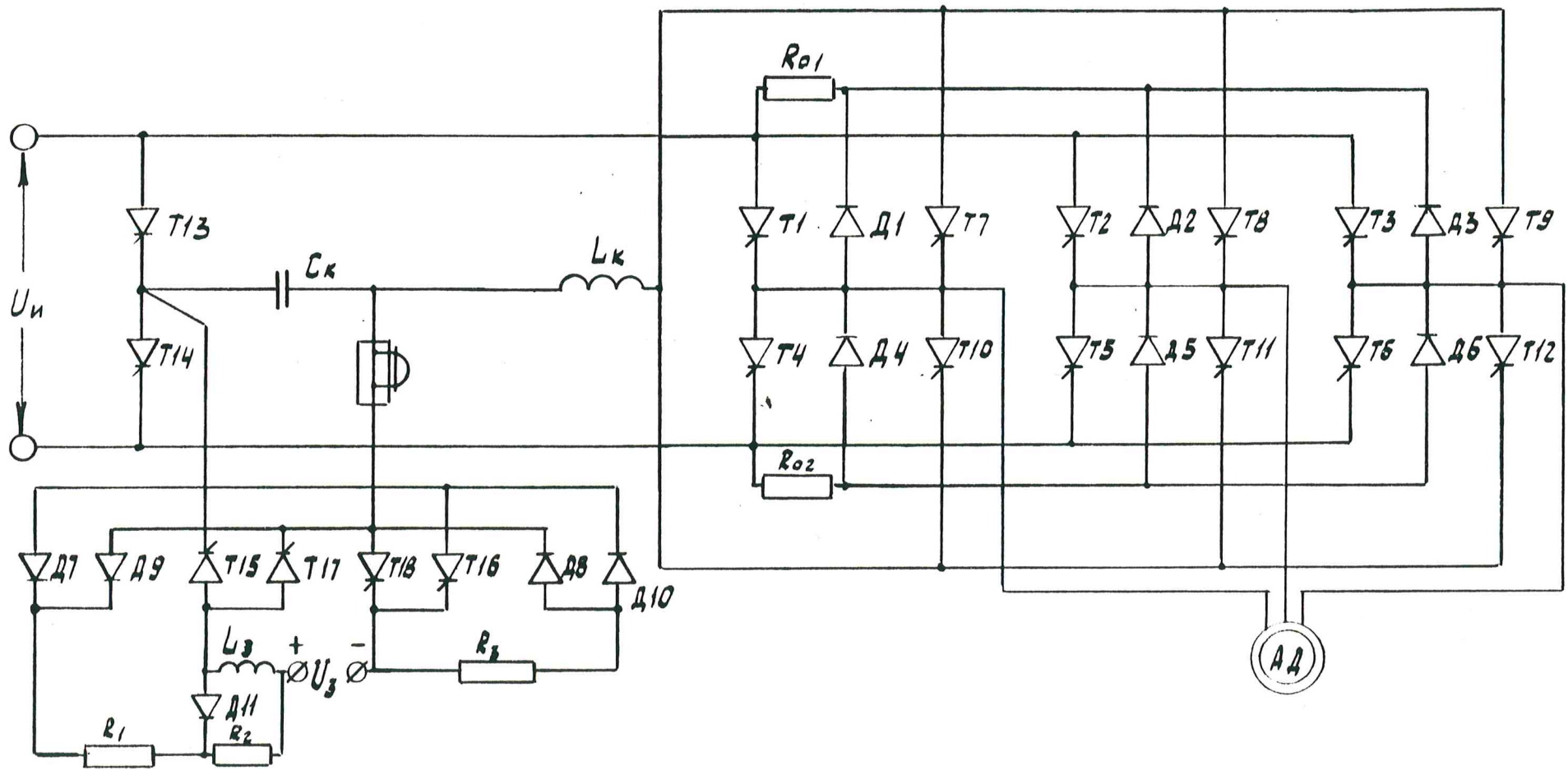


Рис. 43

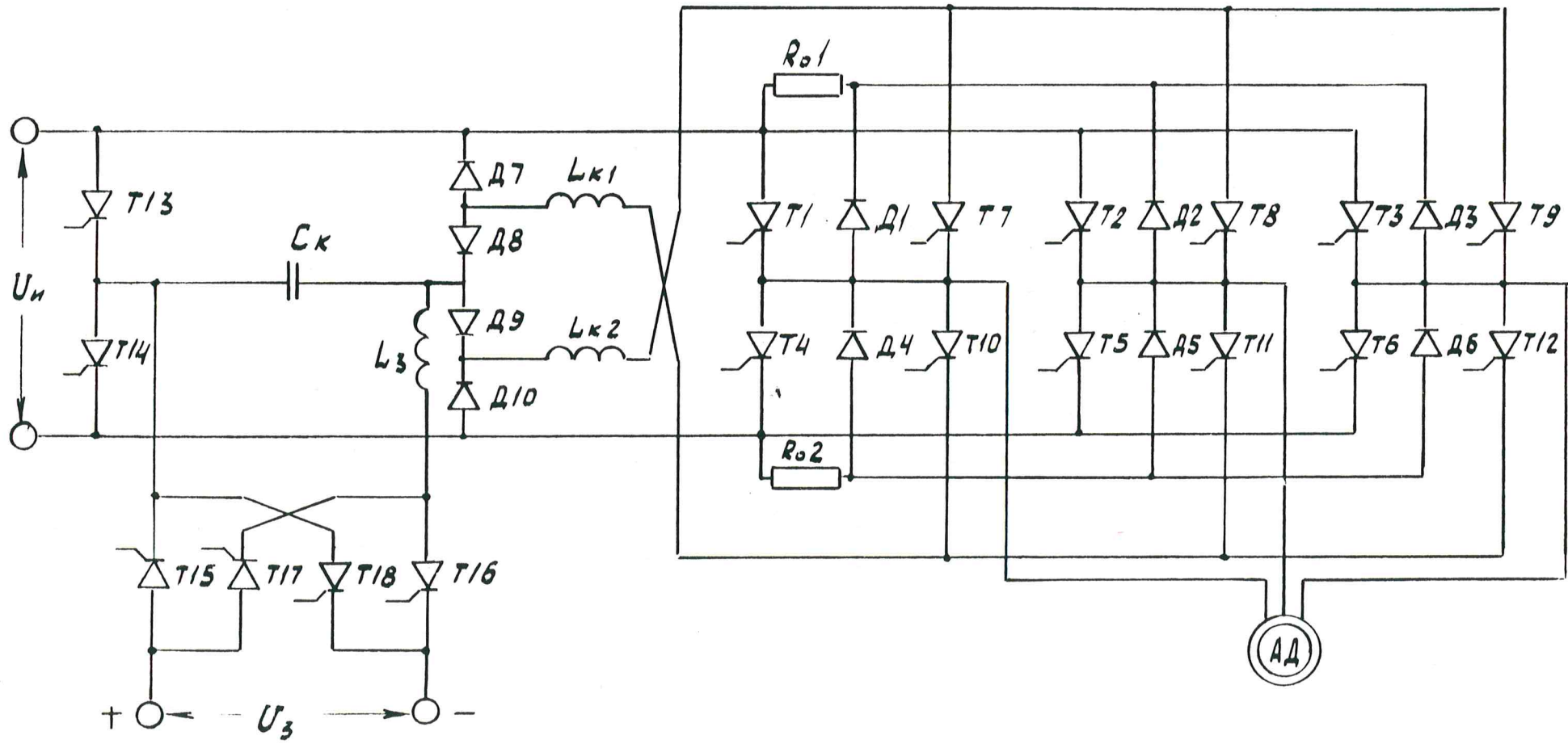


Рис. 44

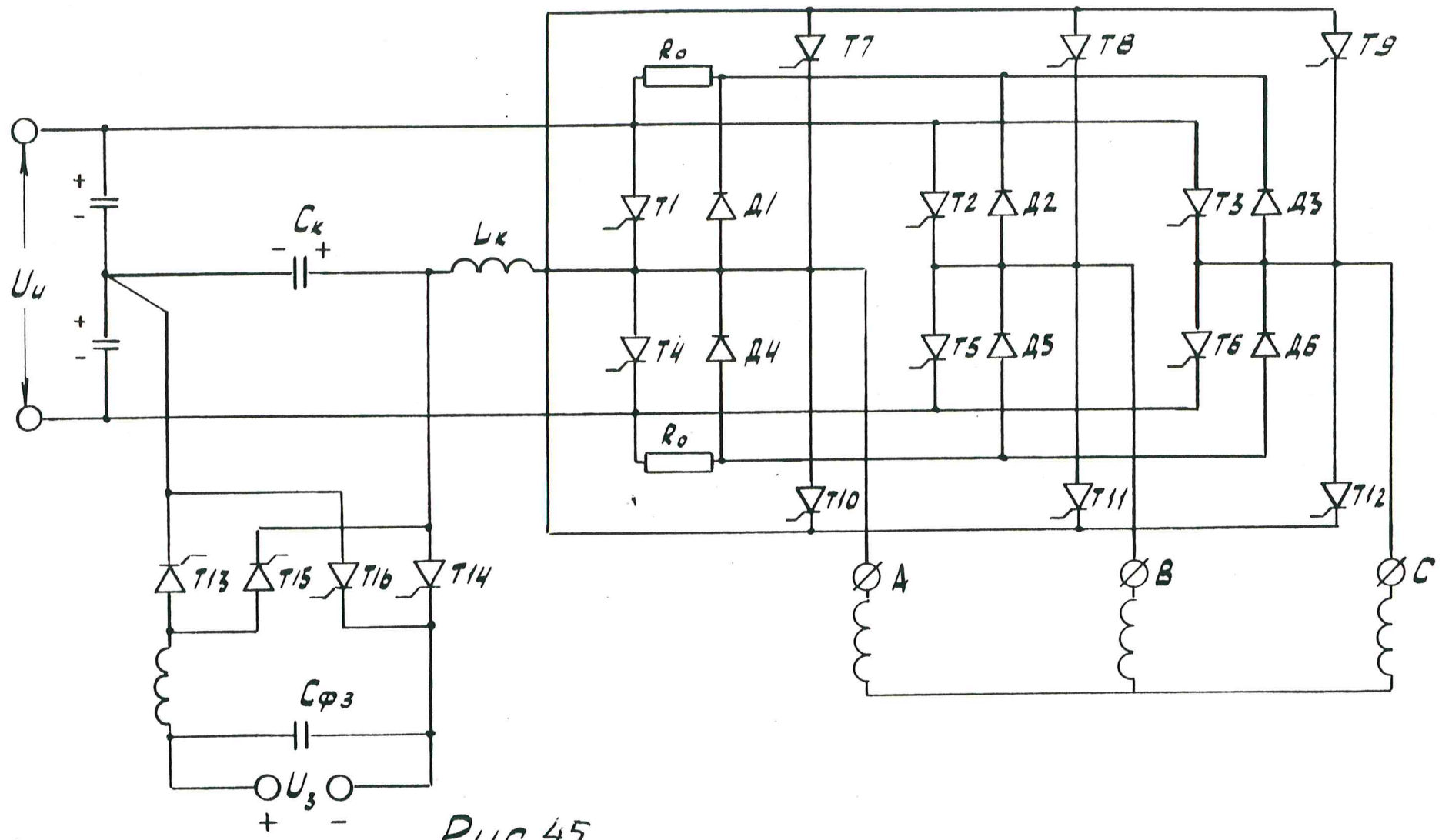


Рис. 45

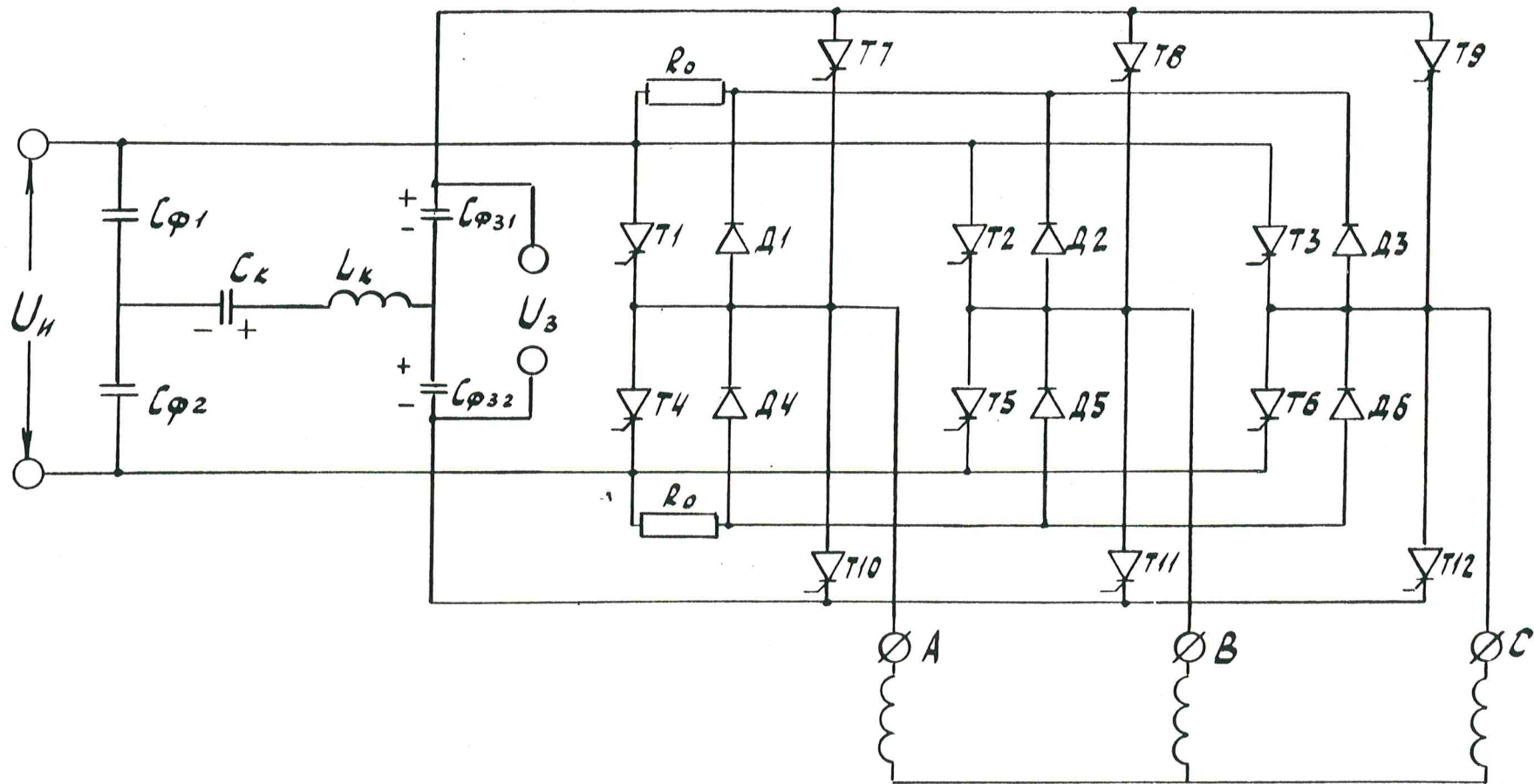


Рис. 46

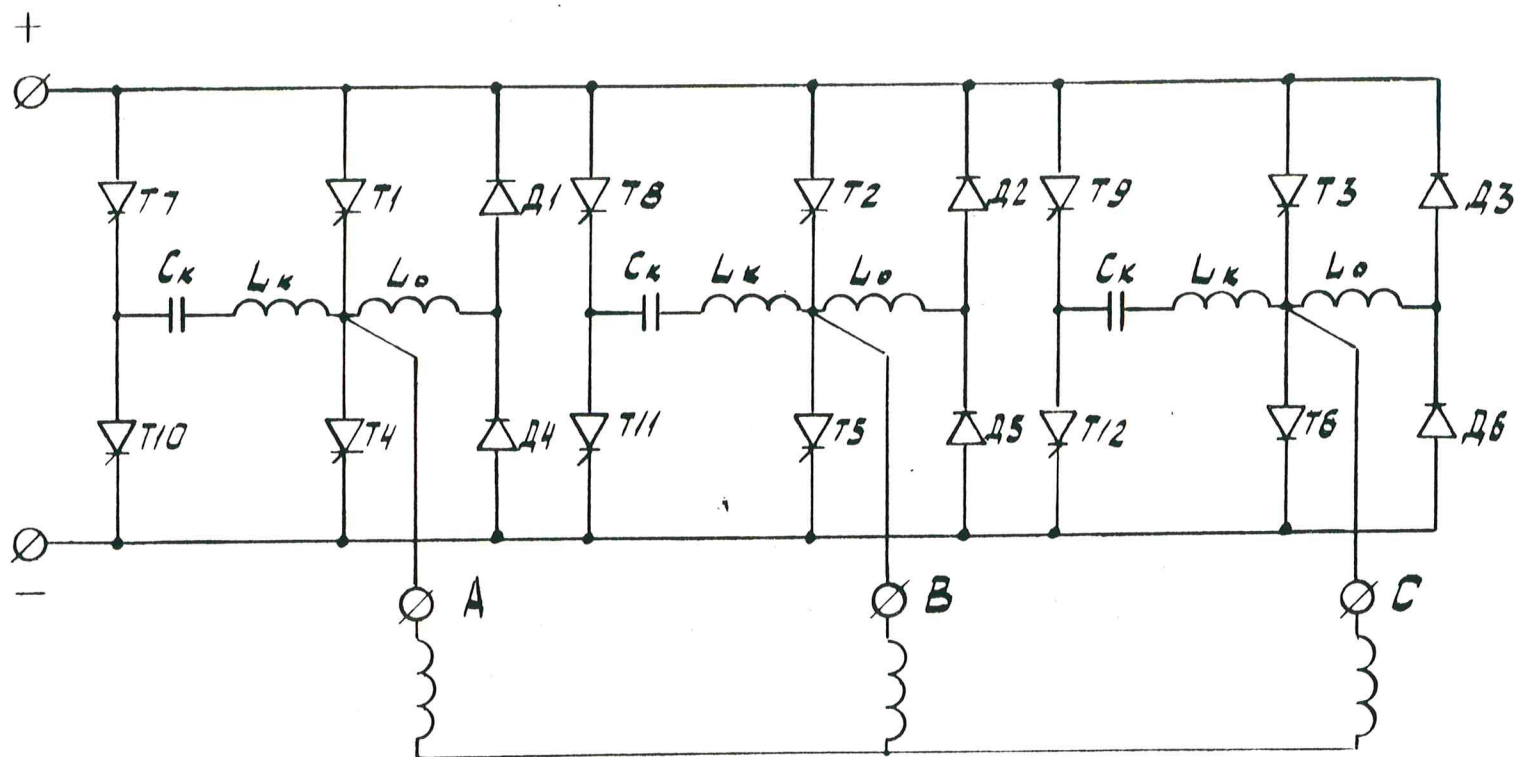


Рис. 47

осц. №1.

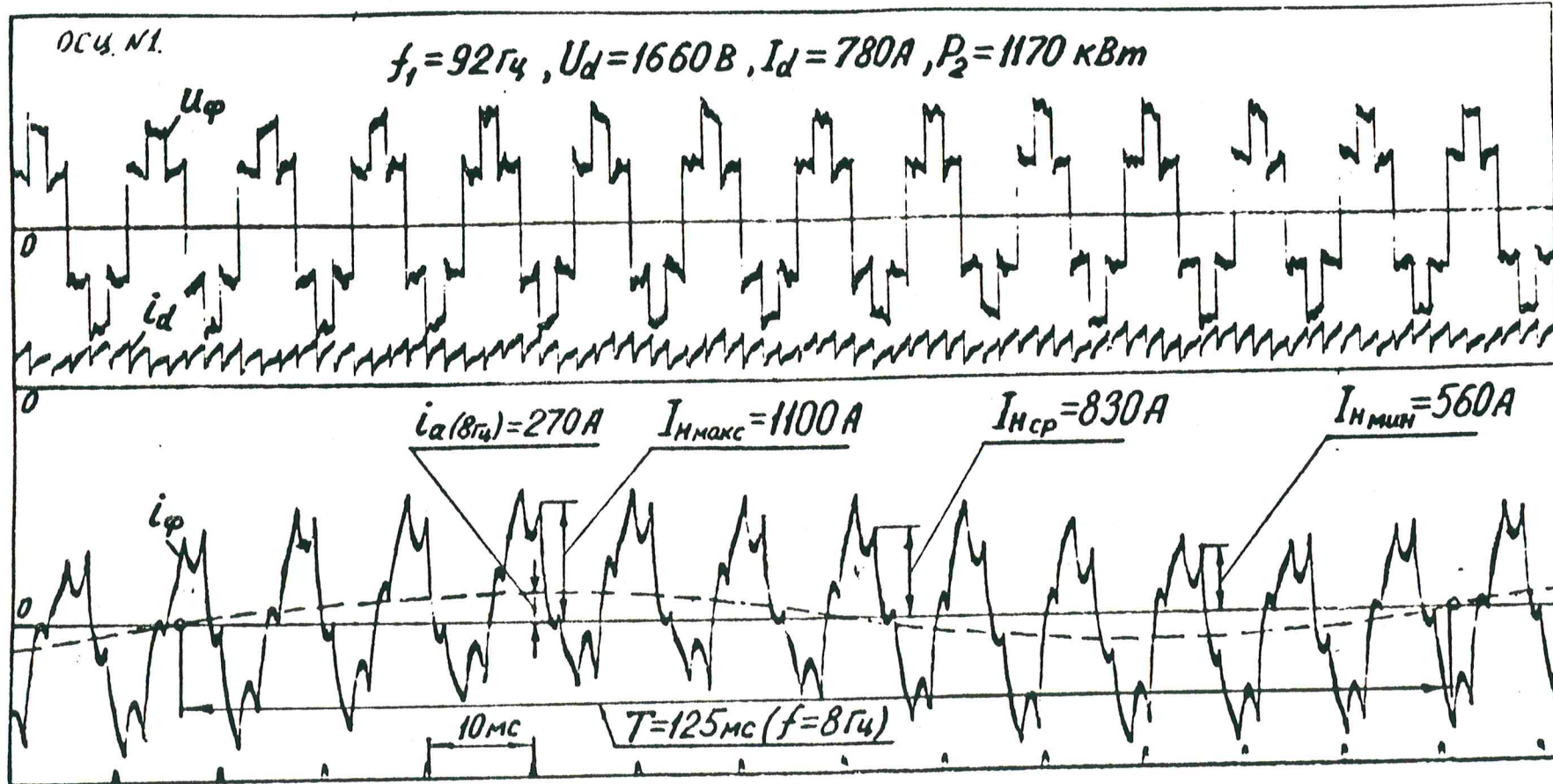


Рис. 48

0° 60° 120° 180° 240° 300° 360°

T1, T3	T1	T1, T2	T2	T2, T3	T3
T5	T5, T6	T6	T6, T4	T4	T4, T5

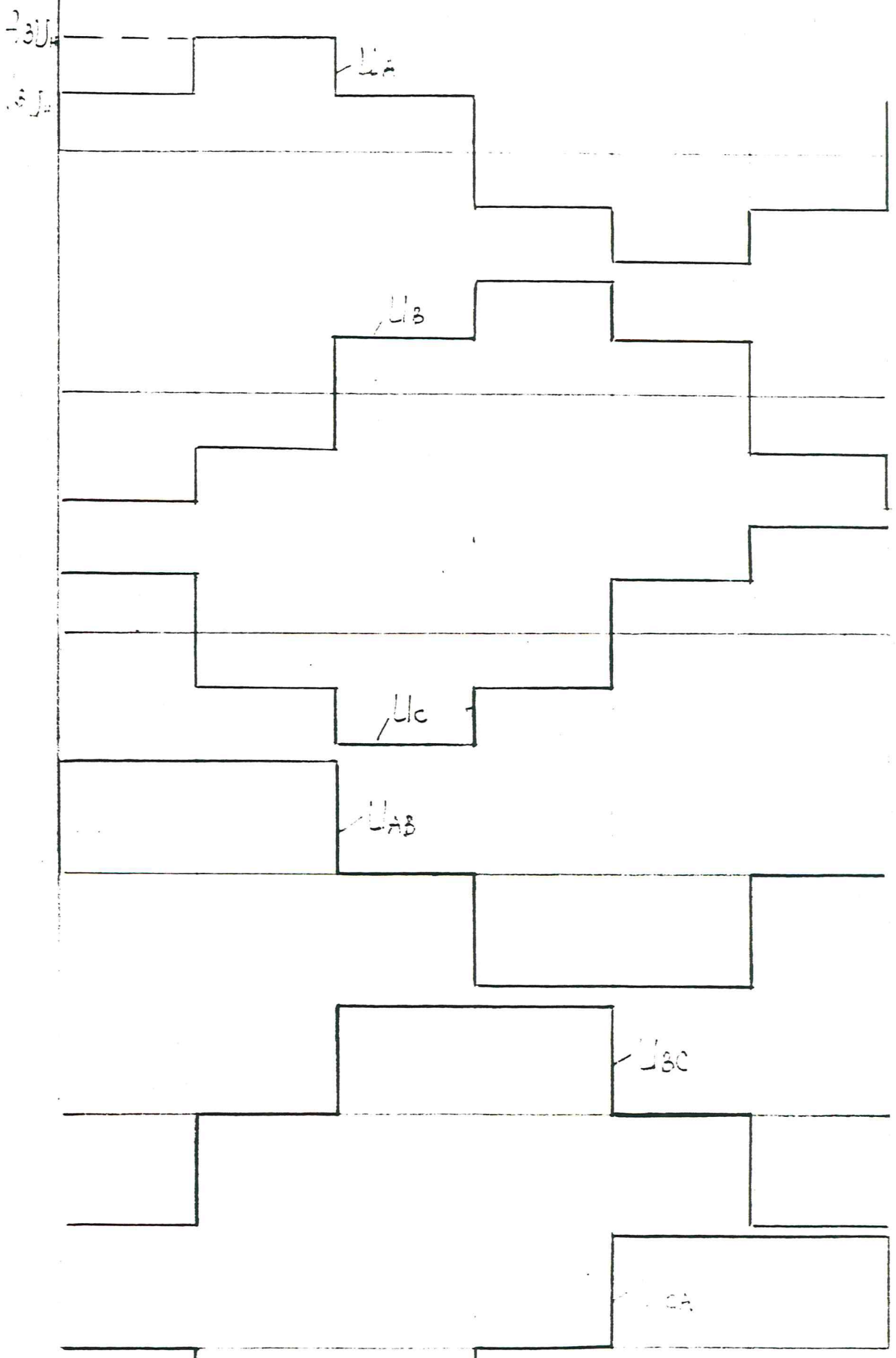


Fig. 49

РЕЖИМ ТЯГУ (f_{сх} > 0)

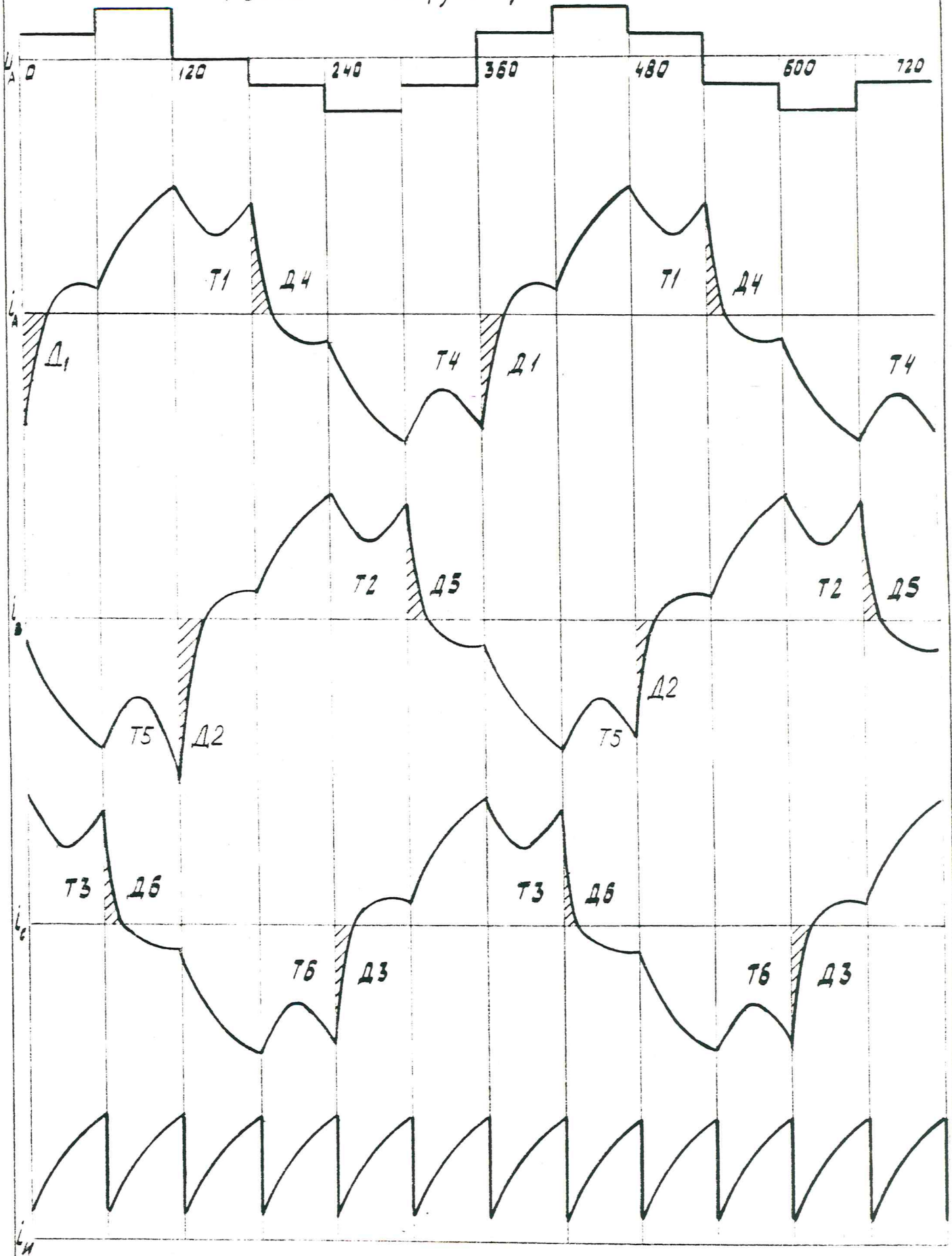
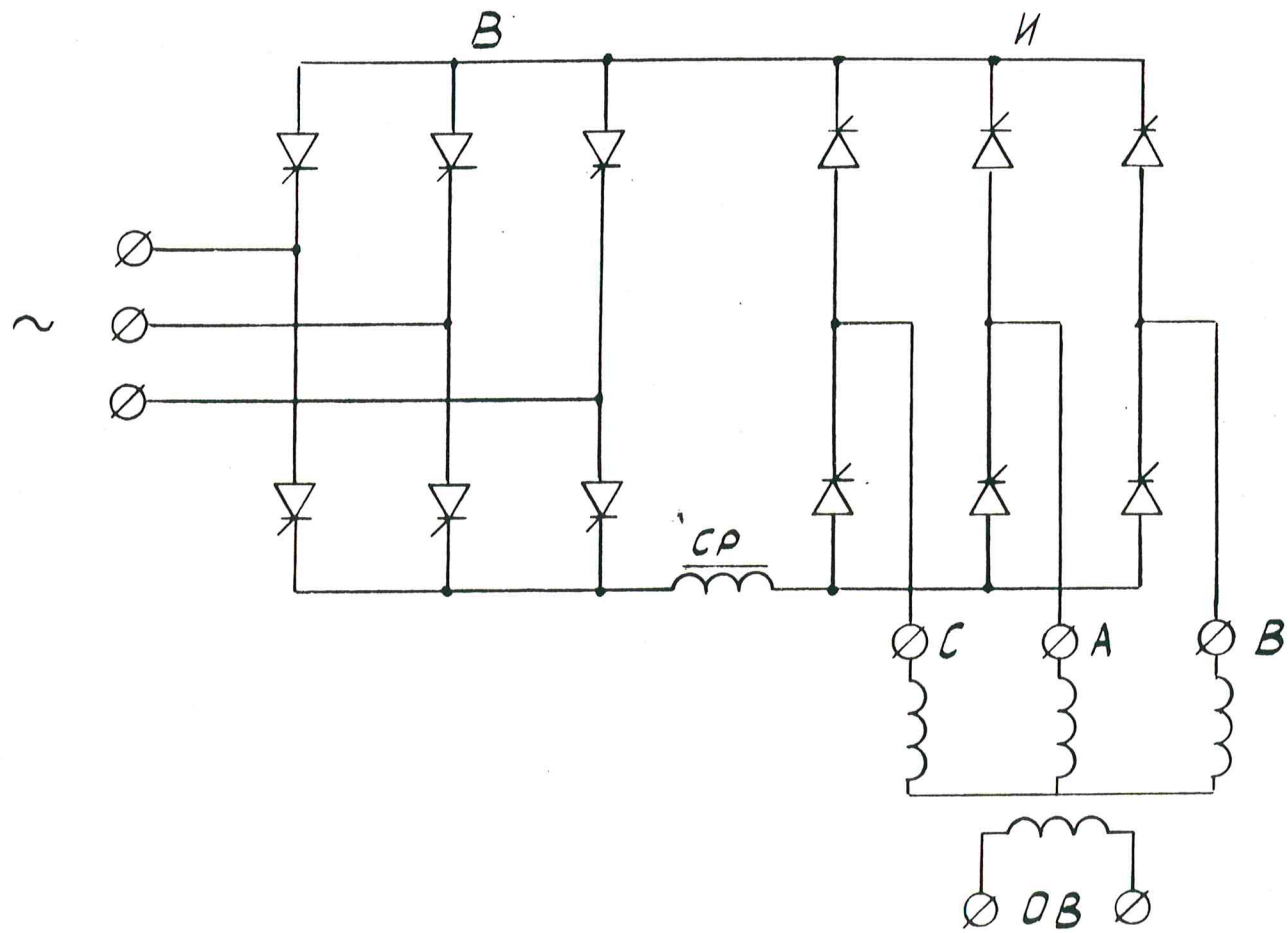


Рис. 50



PUC 51

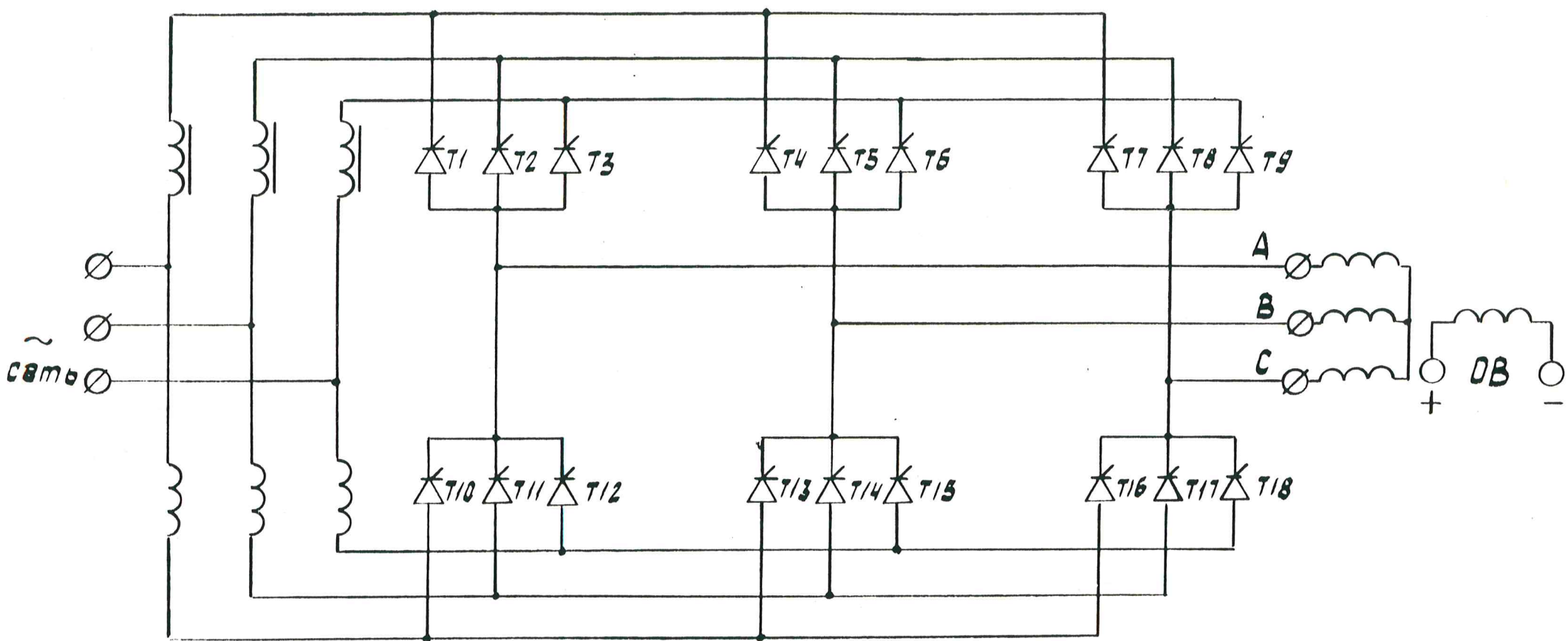


Рис 52

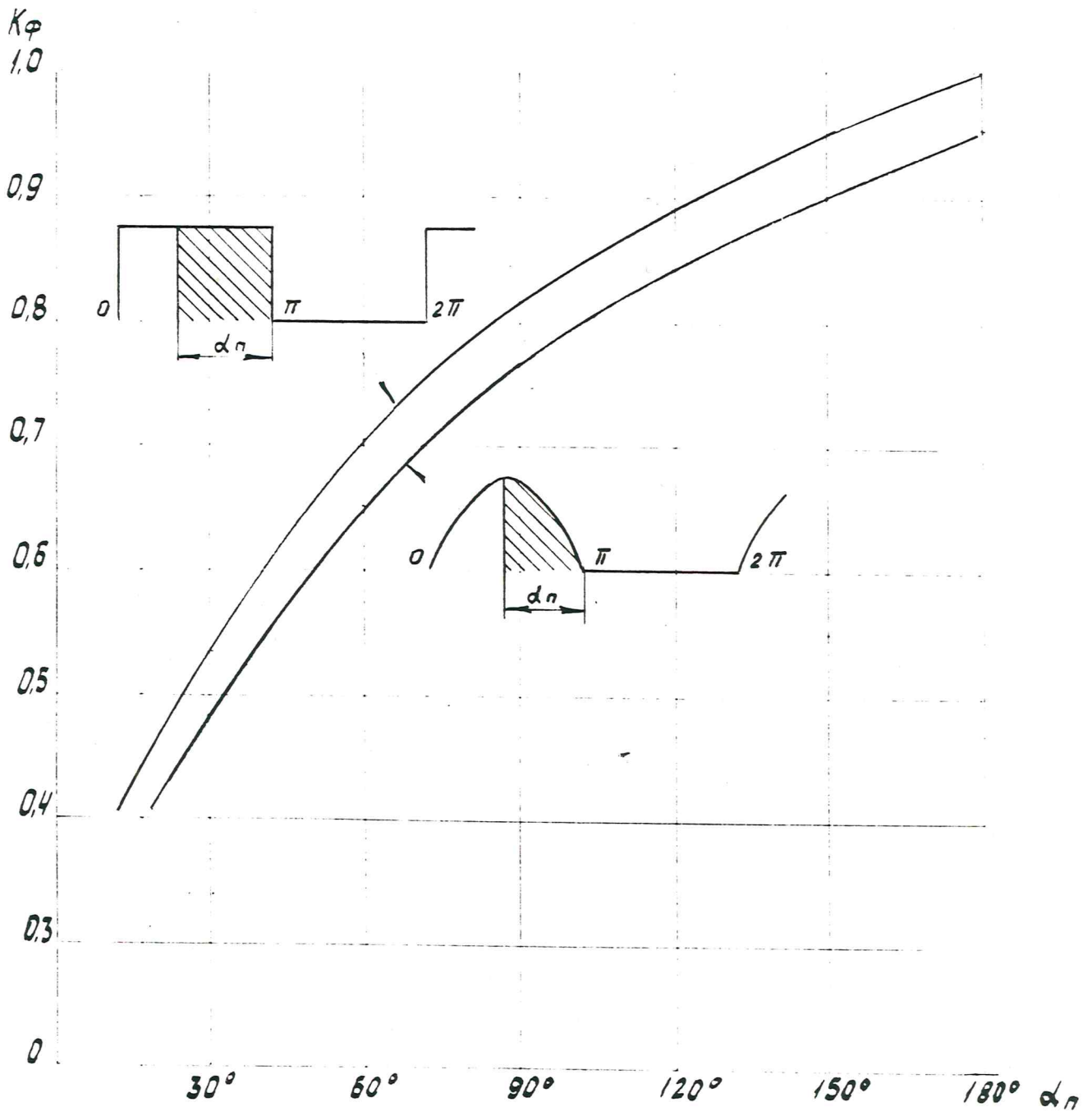


Рис. 53

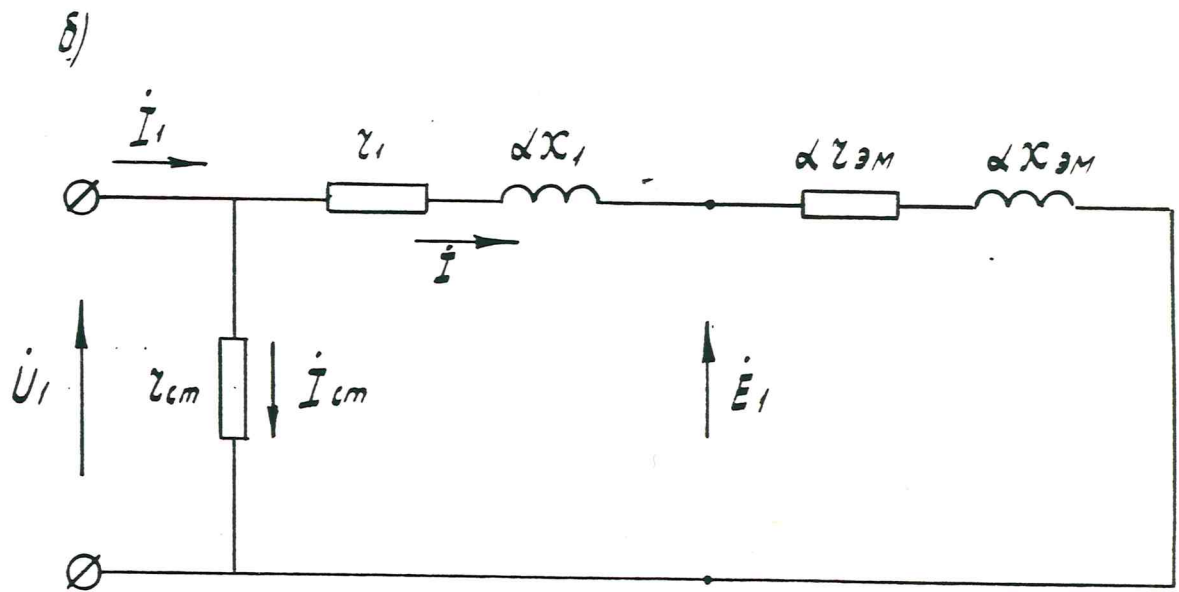
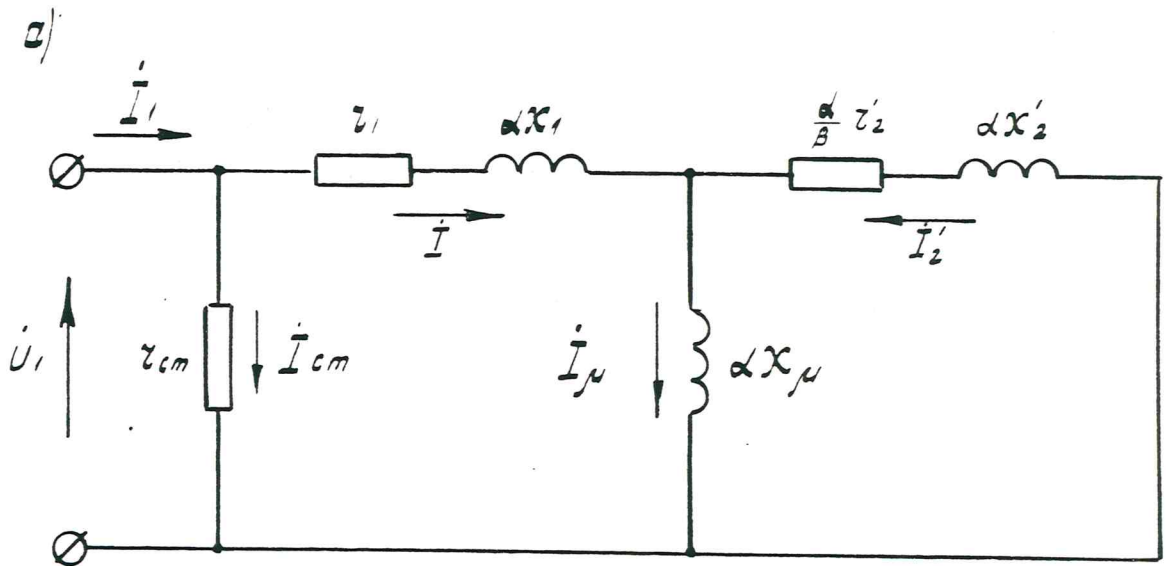


Рис. 54

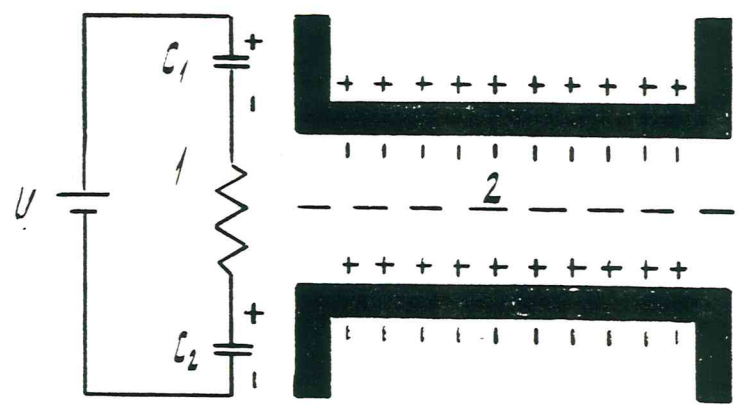


Рис. 55

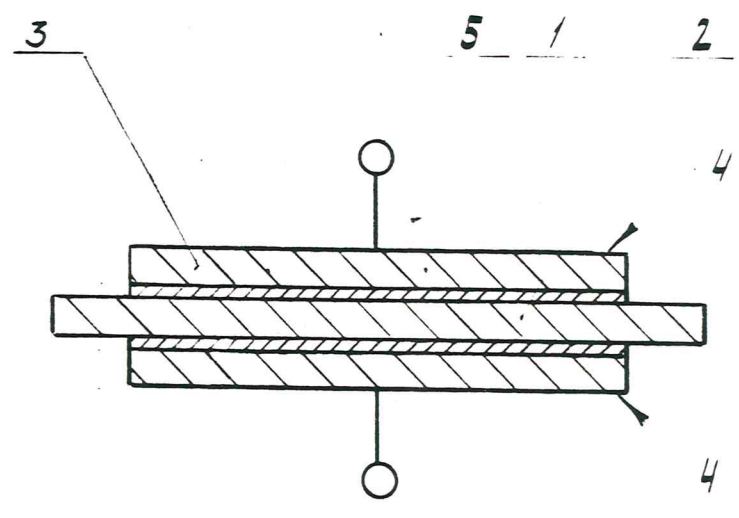
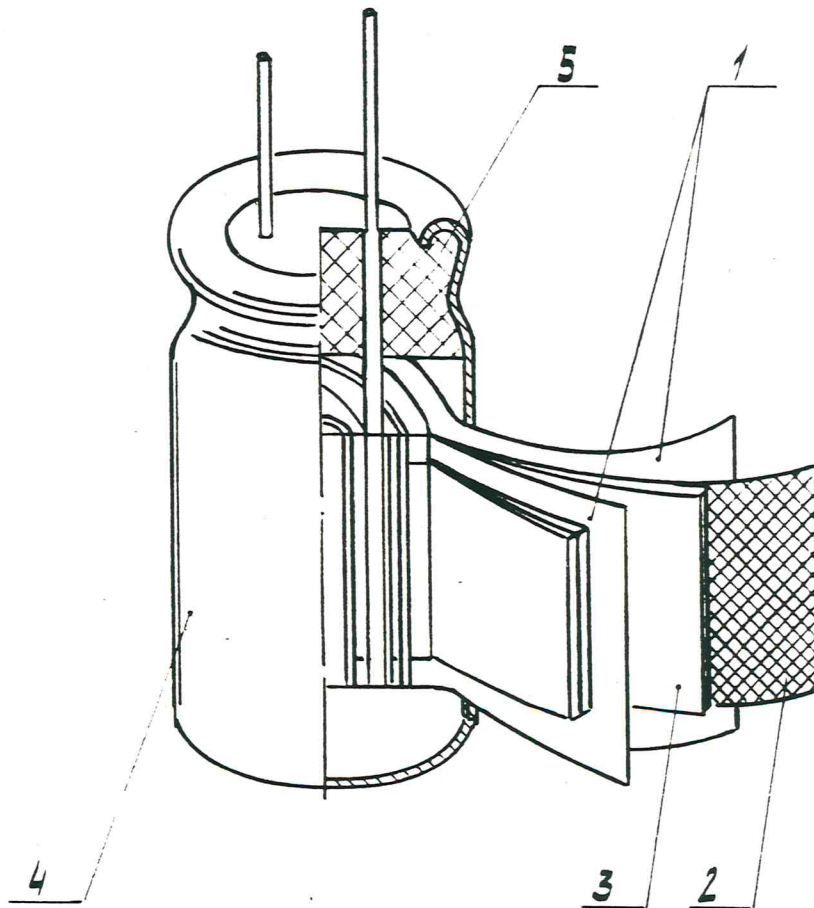
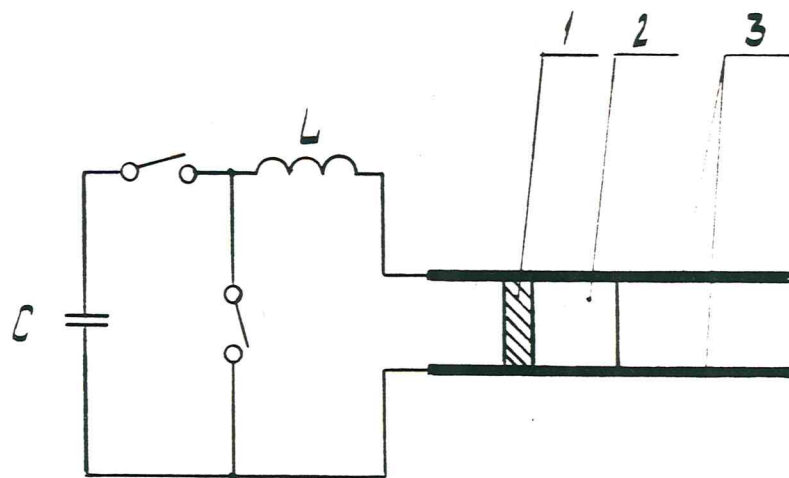


Рис. 56



Puc. 57



Puc. 58

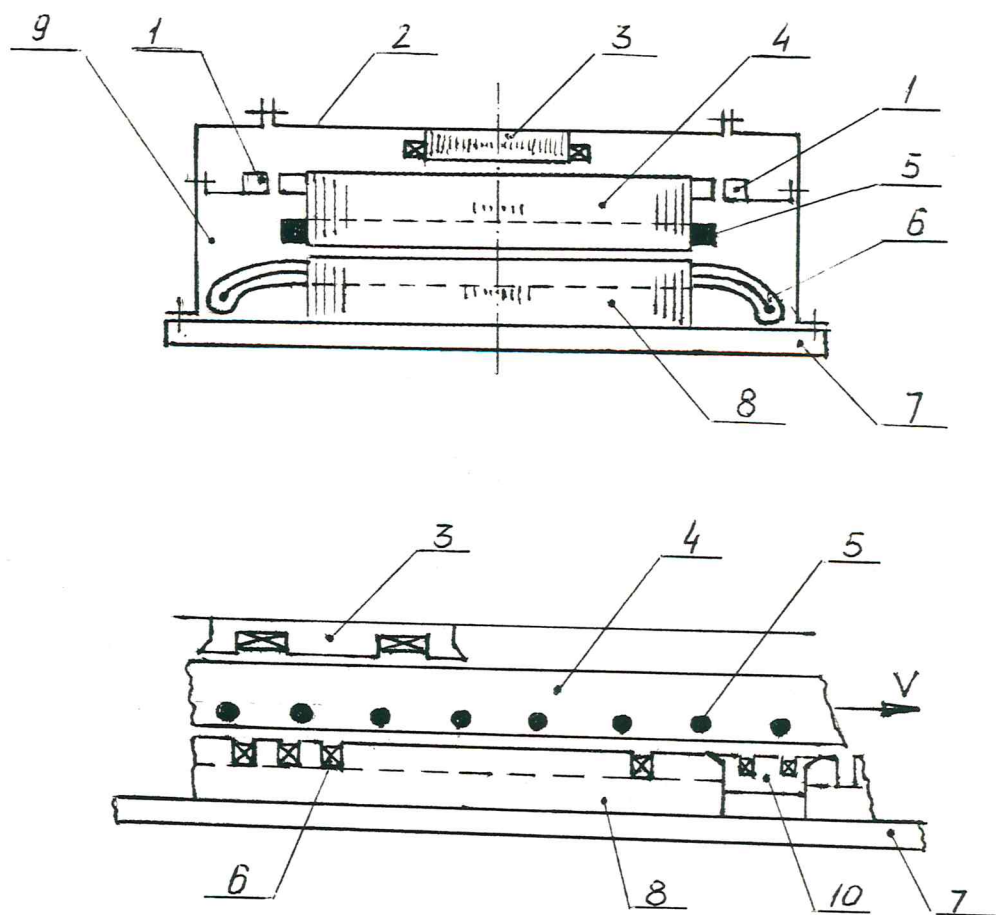


Рис. 59

Пример компоновки двигателя и магнитного подвеса в вакуумном канале

1. Электромагнит поперечной стабилизации.
2. Съемная крышка.
3. Электромагнит подвеса.
4. Ротор.
5. Обмотка ротора.
6. Обмотка статора.
7. Эстакада.
8. Статор.
9. Вакуумный канал.
10. Удерживающий электромагнит.

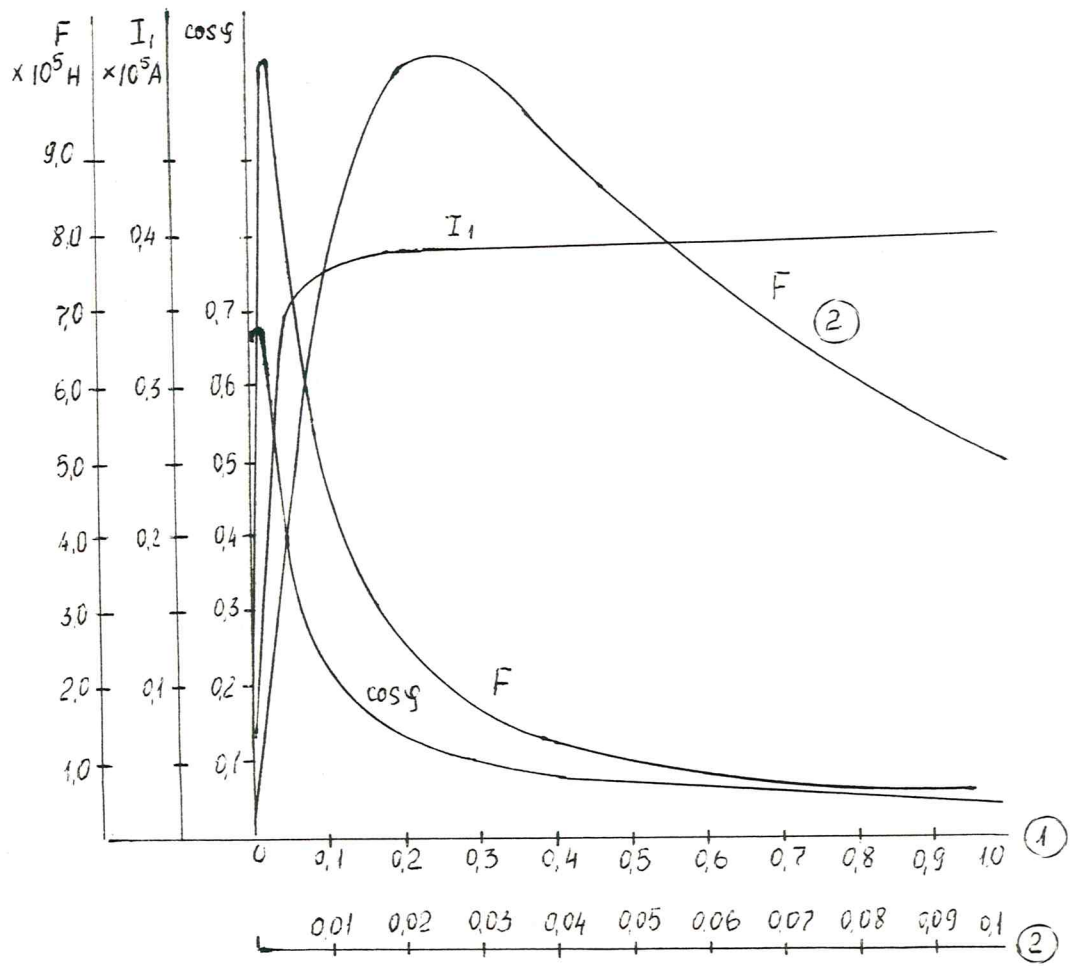


Рис. 60 Пусковые характеристики двигателя

Режим синхронизации ($f_{ск} = 0$)

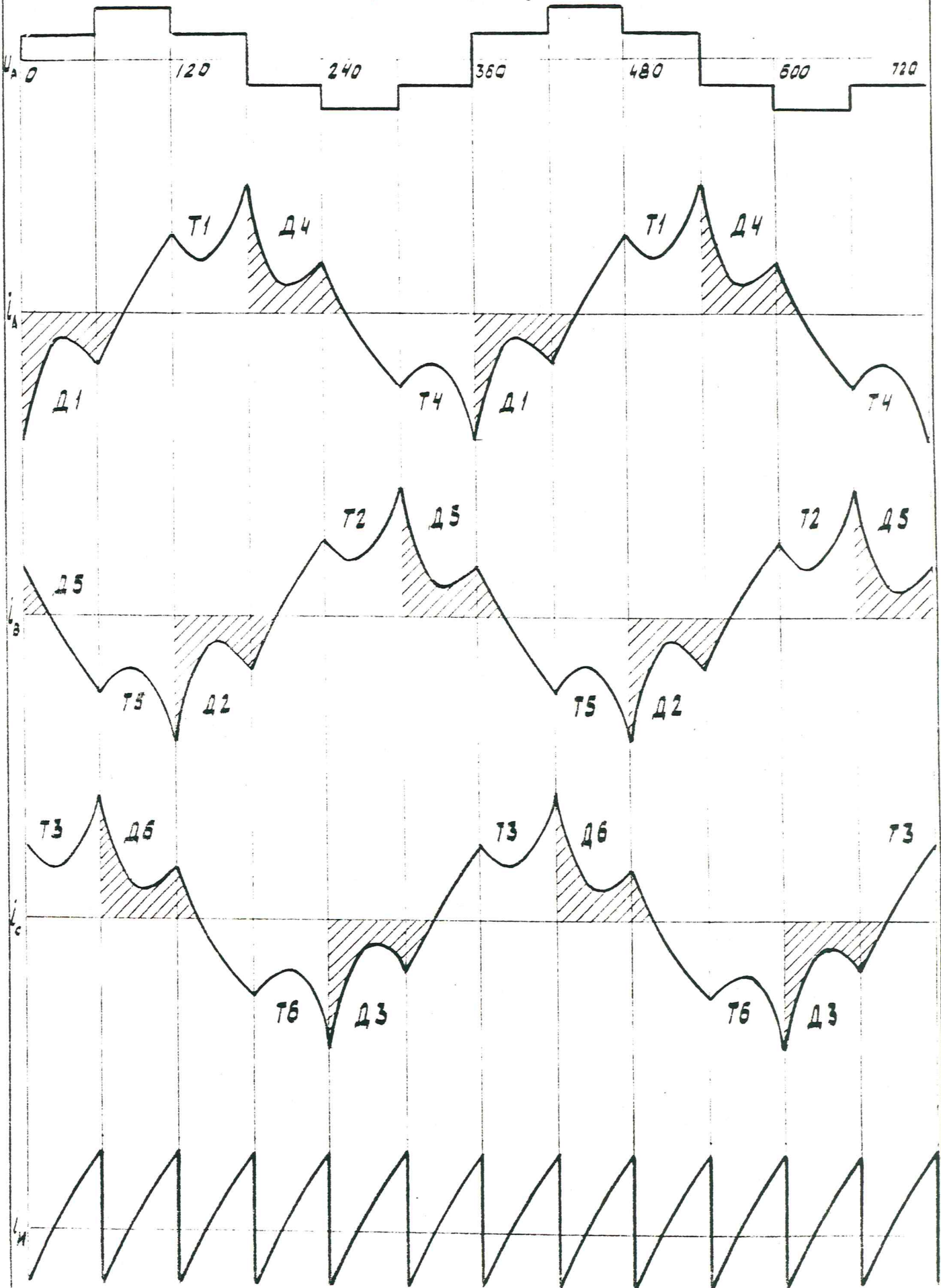


Рис. 61

РѢЖИМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ($f_{ск} < 0$)

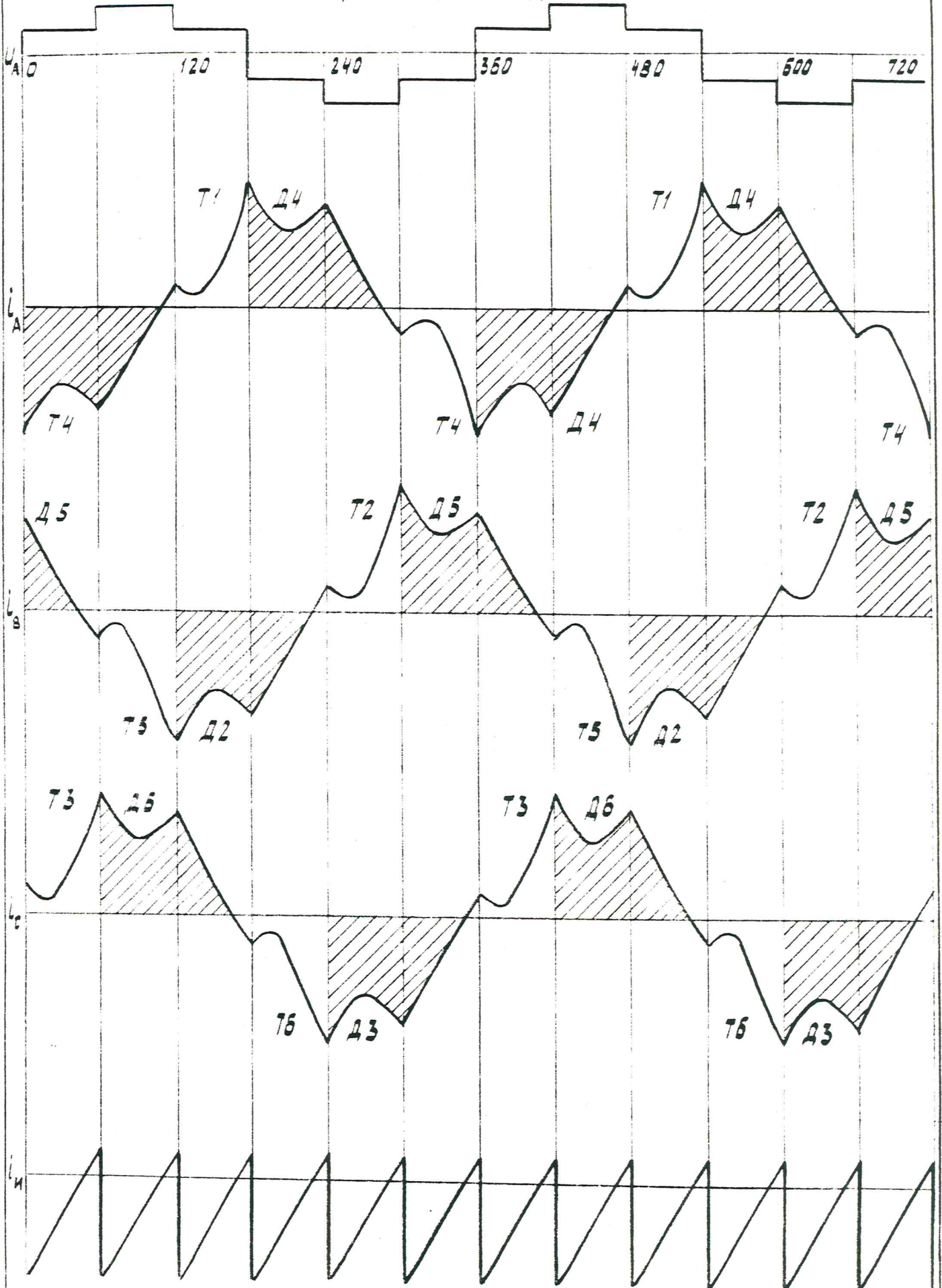


Рис. 62