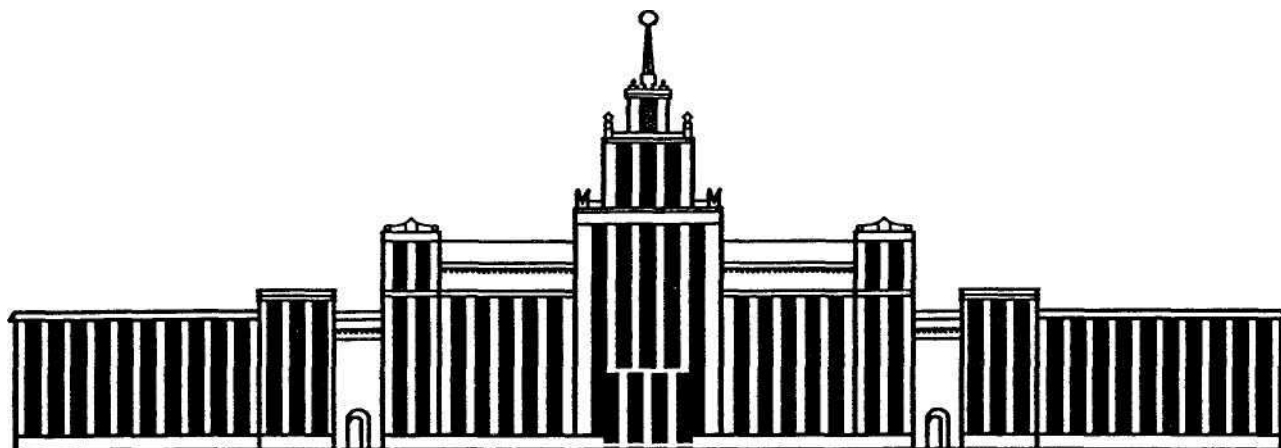

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

629.114.2(07)
А655

В. Е. Андреев, М. И. Абрамов

БЕССТУПЕНЧАТЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕДАЧИ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ

Учебное пособие

Челябинск
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Миасский филиал
Кафедра «Автомобилестроение»

629.114.2(07)
А655

В. Е. Андреев, М. И. Абрамов

**Бесступенчатые электромеханические
передачи автомобилей и тракторов**

Учебное пособие

*Допущено УМО вузов РФ по образованию в
области транспортных машин и транспортно-
технологических комплексов в качестве учебного
пособия для студентов обучающихся по специ-
альности «Автомобиле- и тракторостроение»*

Челябинск
Издательство ЮУрГУ
2011

УДК 629.113(076.5)
А655

*Одобрено
учебно-методической комиссией машиностроительного факультета.*

*Рецензенты:
С.В. Кондаков, В.Н. Рудин*

Андреев, В.Е.

А 655 Бесступенчатые электромеханические передачи автомобилей и тракторов: учебное пособие/В.Е. Андреев, М.И. Абрамов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 96 с.

Учебное пособие разработано и подготовлено в соответствии с учебно-методическими комплексами учебных дисциплин «Специальные главы по конструированию и расчету автомобиля и трактора», «Конструирование и расчет автомобиля и трактора» для студентов очной и заочной форм обучения специальности 190201 – «Автомобиле- и тракторостроение».

УДК 629.113(076.5)

ISBN 978-5-696-03836-0

© Издательство ЮУрГУ, 2011

Глава 1 Электрические и электромеханические передачи, как элементы трансмиссий автомобилей и тракторов

1.1 Классификация передач и требования, предъявляемые к ним

Электрической передачей (ЭП) называется передача, в которой преобразование факторов силового потока приводного двигателя машины во всем диапазоне регулирования осуществляется электрическим трансформатором (ЭТ) крутящего момента, который мы в дальнейшем будем называть просто электротрансформатором.

Простейший электротрансформатор механического силового потока состоит из двух главных электрических машин, одна из которых работает в режиме генератора электрической энергии, а другая – в режиме электродвигателя (рис. 1.1).

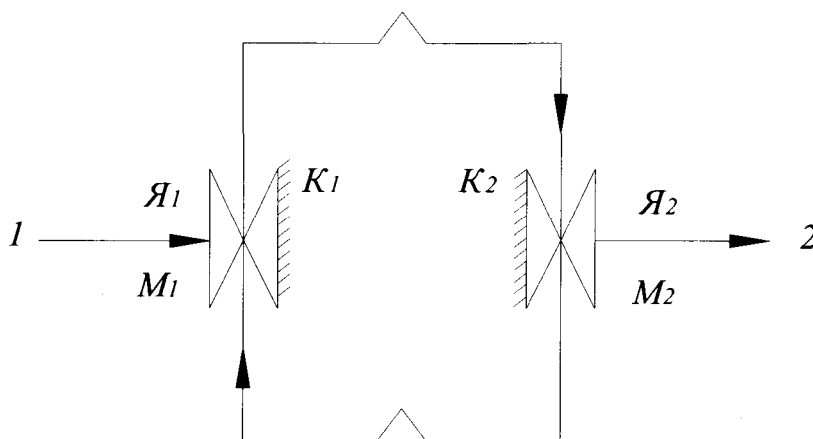


Рисунок 1.1 – Схема силового потока электротрансформатора крутящего момента

Если в передаче кроме электротрансформатора установлены ступенчатые (фрикционно-зубчатые) трансформаторы или дифференциальные зубчатые распределяющие механизмы, передача называется электромеханической (ЭМП).

Электрические передачи на автомобилях пытались применять еще в первые годы автомобилестроения. Неоднократно создавались не только опытные, но и серийные машины с электропередачами, как в СССР, так и за рубежом; из отечественных образцов следует, в частности, упомянуть автобус ЗИЛ-154, выпускавшийся серийно на протяжении ряда лет.

Внимание конструкторов к электропередам не ослабевает и поныне, особенно в связи с созданием многоприводных автомобилей и активных автопоездов. Такой интерес объясняется рядом значительных преимуществ электрических передач. Прежде всего, они непрерывные и могут быть автоматическими или поддаются автоматизации; управление ими не требует больших физических усилий. Путем соответствующего регулирования можно добиться получения практически любых необходимых характеристик («гибкость регулирования»).

Наконец, что особенно существенно, электрическая передача благодаря простоте связей между агрегатами (силовые провода) легко может быть сделана многоприводной и дистанционной. По всем этим свойствам электрические передачи значительно превосходят наиболее близкие к ним гидрообъемные.

Однако эти положительные стороны не могут полностью компенсировать существенные недостатки электропередач.

К ним относятся, прежде всего, большие габариты и вес электрических машин. В осуществленных передачах удельный вес (вес на 0,735 кВт передаваемой мощности) доходил до 20...27 кг/кВт и редко бывал ниже 8...11 кг/кВт, тогда как у механических коробок передач он составляет 2,7...4 кг/кВт. Значительная часть веса электромашин приходится на долю дефицитных цветных металлов (меди).

Электропередачи дают низкий КПД, даже на оптимальных режимах, как правило, не выше 75%. При регулировании в широком диапазоне КПД их значительно снижается.

Кроме того, если иметь в виду и систему регулирования, электропередачи требуют значительно более квалифицированного обслуживания. Несмотря на это, ЭП в последнее время стали применяться в автопоездах с активными прицепами («мотор-колесо»). Монтаж электромашин (электродвигателей) в ступице ведущих колес прицепа дает большие компоновочные преимущества по сравнению с другими типами передач.

Некоторые недостатки электропередач (большой вес, габариты, низкий КПД) существенно уменьшаются в ЭМП с параллельными потоками; правда, передача при этом усложняется, а ряд преимуществ чисто электрической передачи (дистанционность и многоприводность) утрачивается.

На рисунке 1.2 приведены схемы силовых потоков ЭП (а) и ЭМП. Последние могут быть с последовательным (б) или параллельным потоком: двухпоточные типа РМ (в), типа МР (г) и трехпоточные (д).

На схемах СП электротрансформатор крутящего момента (УТ-ЭТ) обозначен так же как гидродинамический трансформатор, в виде обобщенной точки с дополнительной степенью свободы.

Во всех схемах может иметься дополнительная ступенчатая коробка передач (УТ-К), установленная последовательно с трансформатором; коробки передач может и не быть, особенно в трехпоточных передачах, поэтому в параллельных схемах она не показана.

Помимо схем силового потока, электрические передачи и электро-механические передачи классифицируются по типам и основным особенностям электротрансформаторов и по способам регулирования последних.

1.2 Классификация электротрансформаторов крутящего момента

Электротрансформаторы в электрических и электро-механических передачах различаются по ряду признаков: по виду тока, по числу электродви-

гателей, по типу машин и по способу управления электротрансформатором (его регулирования).

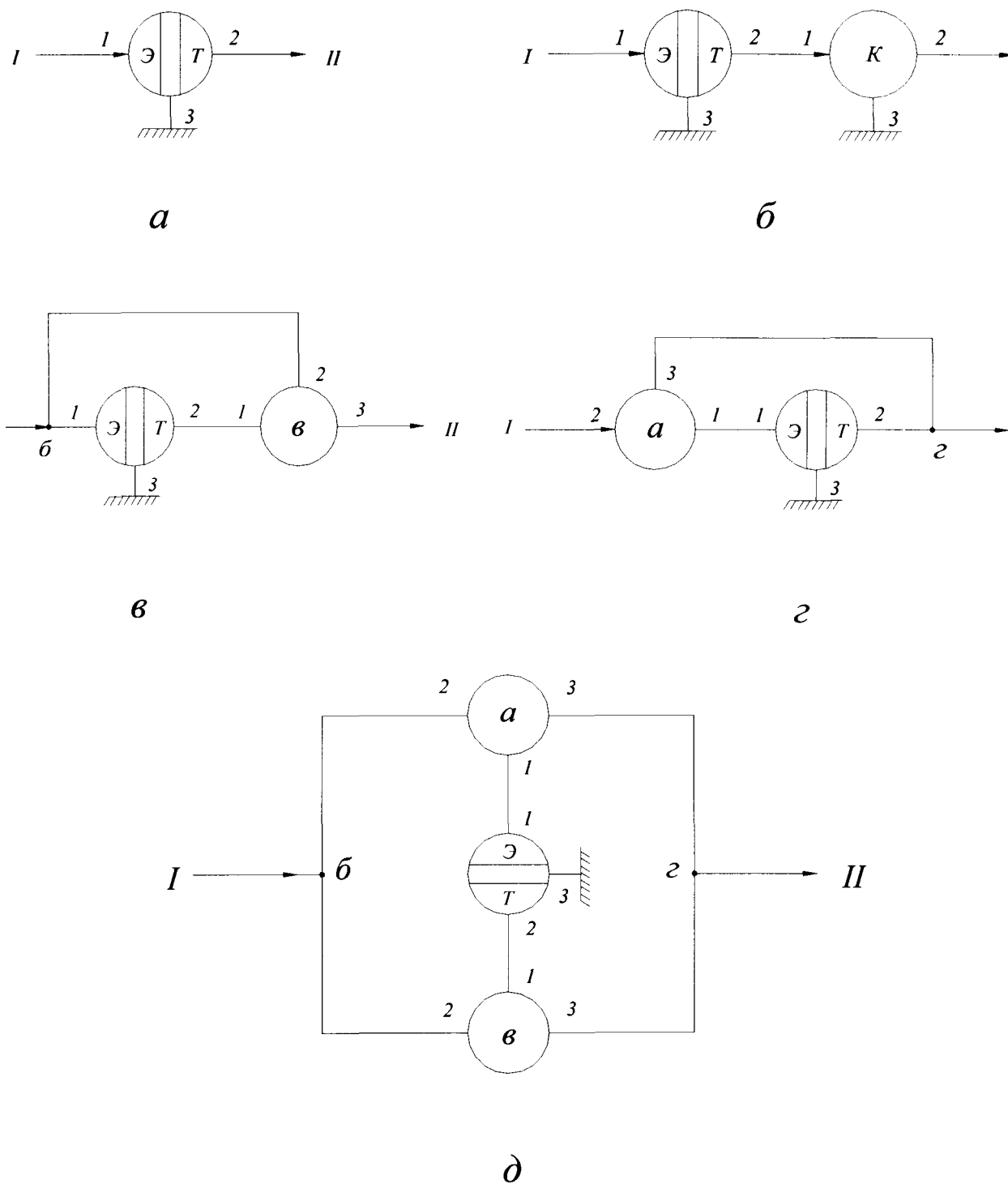


Рисунок 1.2 – Схемы СП электрических и электромеханических передач:

а – электротрансформатор;

б – электротрансформатор с дополнительной коробкой передач;

в – передача типа РМ;

г – передача типа МР;

д – трехпоточная передача.

По виду тока различают электротрансформаторы с машинами постоянного и переменного тока.

Общеизвестные преимущества электрических машин переменного тока (главным образом двигателей) и, прежде всего, значительно меньшие габариты и вес привлекают к ним особое внимание конструкторов. Препятствием к их применению является сложность системы регулирования; для получения необходимого в автомобильных силовых передачах широкого диапазона регулирования целесообразнее всего применять частотное регулирование, однако простые, надежные и малогабаритные устройства для плавного регулирования частоты пока не разработаны.

Поэтому ниже мы рассматриваем только электротрансформаторы с машинами постоянного тока. По числу электродвигателей (или приводности) имеются электротрансформаторы одноприводные (одномоторные) и многоприводные (многомоторные).

В одноприводных электротрансформаторах один электродвигатель обслуживает все ведущие колеса машины через систему механизмов (раздаточные коробки, мосты). Одноприводной электротрансформатор применялся на автобусе ЗИЛ-154; такой же электротрансформатор устанавливается на промышленном гусеничном тракторе ДЭТ-250.

Одноприводной электротрансформатор наиболее прост по схеме и устройству и, как правило, обеспечивает меньший вес электрической части передачи, чем многоприводной. Это, в частности, связано с тем, что каждый двигатель многоприводного электротрансформатора приходится рассчитывать с запасом, т.е. на мощность $k \cdot N_{e \max} / n$ (где k - коэффициент запаса, больший единицы; n - число двигателей).

Однако для многоприводных автомобилей и поездов осуществление механических связей от одного двигателя к большому числу колес требует значительного усложнения и утяжеления силовой передачи. Поэтому здесь безусловное предпочтение следует отдать многоприводным электротрансформаторам, где один генератор питает энергией несколько электродвигателей. Каждый из двигателей может приводить одно ведущее колесо («мотор-колесо»), одну ось («мотор-ось») или целую тележку, например, прицеп.

По типу машин различаются электротрансформаторы с машинами одинарного вращения, которые имеют неподвижные корпуса или статоры, и с машинами двойного вращения, у которых корпуса одной или обеих машин вращаются. Такие электротрансформаторы называются дифференциальными.

Применение машин двойного вращения обычно преследует цель уменьшения абсолютных угловых скоростей якоря. Этим путем также можно улучшить характеристику передачи и снизить потери, уменьшая мощность, передаваемую электрическим путем, однако того же результата проще достичь, вводя в передачу механические узлы. Машины двойного вращения сложнее и дороже обычных и по этому широкого распространения не получили.

По способу управления электротрансформаторы, как и другие виды трансформаторов, делятся на автоматические и регулируемые; последние мо-

гут быть автоматизированы. Машины (или хотя бы одна из машин) автоматического электротрансформатора работают с самовозбуждением или смешанным возбуждением, имея серийную обмотку, благодаря этому изменение нагрузки (тока) влияет на магнитный поток возбуждения, что позволяет интенсивно воздействовать на характеристику машины и электротрансформатора в целом.

Регулируемые электротрансформаторы имеют машины с независимым (или смешанным) возбуждением, причем магнитный поток изменяется принудительно или автоматически (автоматизированное регулирование). Регулируемый электротрансформатор требует сложной системы управления, но он позволяет получать характеристики, более соответствующие условиям движения автомобиля.

Поэтому, особенно в параллельных передачах, следует отдавать предпочтение регулируемым передачам с сочетанием автоматизированного и принудительного регулирования.

1.3 Основные требования к электропередачам и электротрансформаторам

К электрическим передачам и электротрансформаторам предъявляются те же требования, что и к силовым передачам автомобилей и входящим в них трансформаторам вообще. Главным из этих требований является обеспечение заданного диапазона регулирования при малом весе, габаритах и высоком КПД. Как уже указывалось, эти требования в ЭП удовлетворяются плохо, так как диапазон непрерывного регулирования более 4-5 при удовлетворительном КПД (не ниже 0,7) обеспечить трудно. При этом удельный вес передачи и ее стоимость в два-три раза выше механической.

Относительные весовые показатели передачи значительно улучшаются при многоприводной схеме (не смотря на увеличение общего веса электромашин) благодаря устранению карданной передачи, мостов и полуосей. Так, по данным Н. А. Погарского, удельный вес спроектированной многоприводной электропередачи на 441 кВт составил 24,5 кг/кВт, тогда как у автомобиля МАЗ-501 силовая передача имеет удельный вес 24,5 кг/кВт, у автомобиля МАЗ-525 - 36,7 кг/кВт, у автомобиля ЗИЛ-157 - 13,6 кг/кВт. Однако это не снимает указанных недостатков по диапазону и к.п.д. Эти показатели заметно улучшаются у одноприводных электромеханических передач. Так, максимальный к.п.д. электромеханической передачи на 510,2 кВт достигал 0,9 при удельном весе 15,24 кг/кВт.

Сочетание преимуществ ЭМП и многоприводной ЭП достигается в комбинированных передачах, где к части ведущих колес мощность подводится через механическую передачу, а к остальным - через электрическую.

Особым требованием к ЭТ является обеспечение пожарной и травматической безопасности. В этих целях желательно снижение напряжения электрических машин. Однако это противоречит условию уменьшения омических

потерь в силовых проводах, длина которых, особенно у активных поездов, может быть весьма значительной. Поскольку в большинстве случаев в ЭТ автомобилей стремятся использовать серийные электрические машины, напряжение их колебалось в весьма широких пределах - от 20 до 600 В. В специально спроектированных для ЭТ машинах предпочтение отдавалось все же уменьшению тока и напряжение принималось порядка 200...450 В. Безопасность обеспечивалась надежной изоляцией и укрытием коллекторно-щеточных узлов.

1.4 Схемы и типовые конструкции электротрансформаторов

Одноприводные электротрансформаторы. Одноприводные ЭТ могут быть дистанционные и объединенные.

Дистанционный ЭТ состоит из двух самостоятельных машин, установленных независимо одна от другой, конструктивно между собой не связанных и соединенных только электрическими проводами.

Дистанционный ЭТ обеспечивает компоновочные преимущества и позволяет самостоятельно подбирать обе машины из числа подходящих по характеристикам.

Примером дистанционного ЭТ с машинами одинарного вращения служит ЭТ автобуса ЗИЛ-154 (с двигателем ЯАЗ-204 на 80,85кВт). Электрическая схема ЭТ представлена на рисунке 1.3.

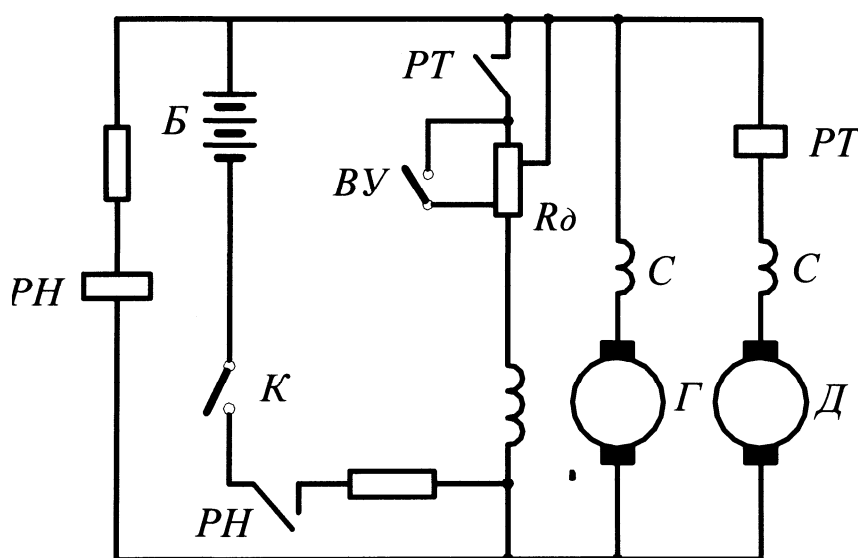


Рисунок 1.3 – Электрическая схема электротрансформатора автобуса ЗИЛ-154:
Г – генератор ДК-505А (50 кВт);
Д –тяговый электродвигатель ДК-305А (31,6кВт).

Генератор имеет смешанное возбуждение, причем для независимого возбуждения используется шунтовая обмотка III, подключаемая при разгоне автобуса через контакты К (управляемые педалью подачи горючего) к аккумуляторной батарее Б.

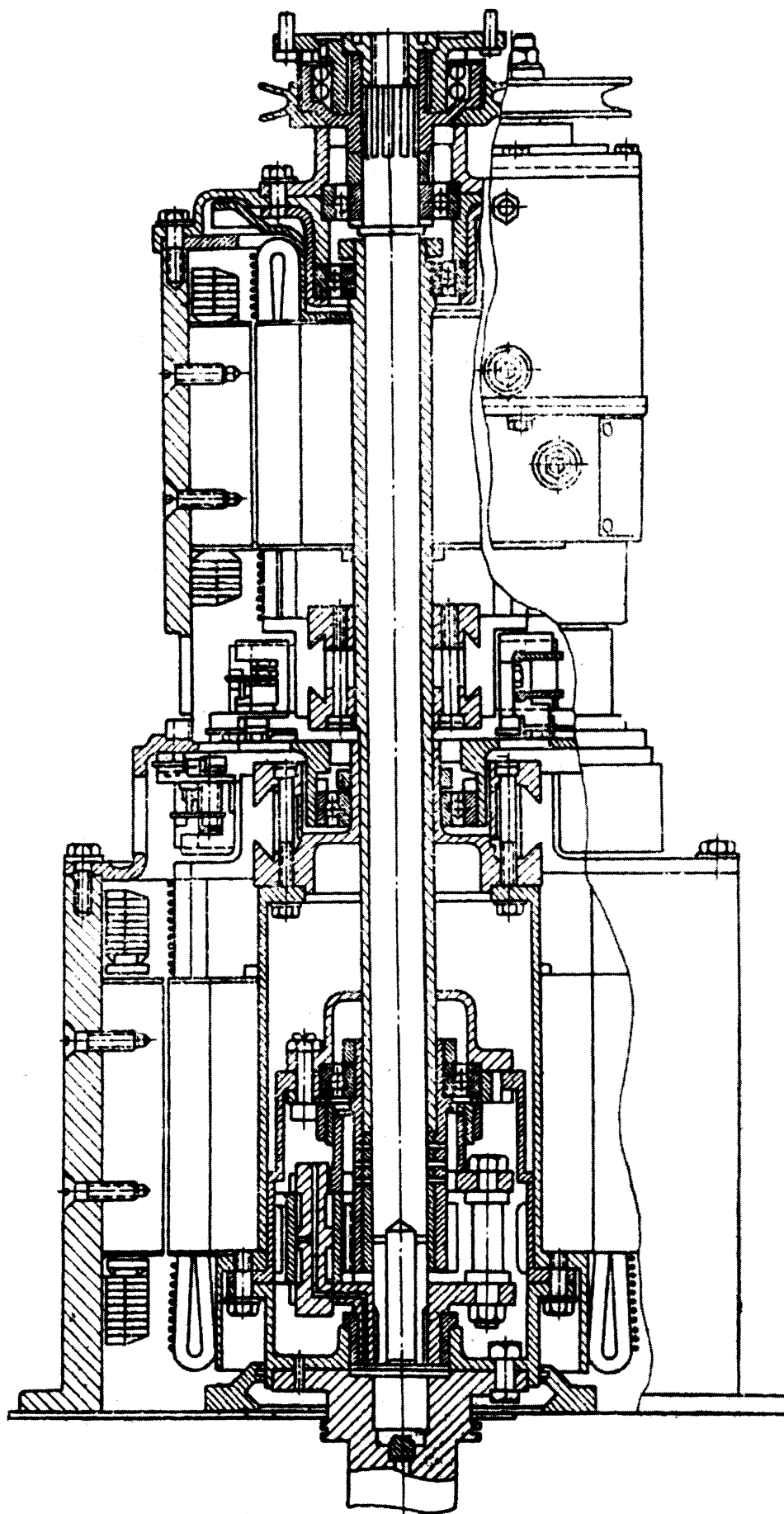


Рисунок 1.4 – Передача АСР

По достижении напряжения 90 В батарея отключается, реле РН и обмотка питаются от генератора через добавочное сопротивление K_d . Последнее может быть частично шунтировано ручным выключателем ВУ и реле тока РТ, срабатывающим при снижении тока нагрузки до 240 А (номинальный ток 150 А при 350 В, максимальный - до 600 А примерно при 60 В).

Генератор имеет смешанное возбуждение, причем для независимого возбуждения используется шунтовая обмотка Ш, подключаемая при разгоне автобуса через контакты К (управляемые педалью подачи горючего) к аккумуляторной батарее Б. По достижении напряжения 90 В батарея отключается, реле РН и обмотка питаются от генератора через добавочное сопротивление K_d . Последнее может быть частично шунтировано ручным выключателем ВУ и реле тока РТ, срабатывающим при снижении тока нагрузки до 240 А (номинальный ток 150 А при 350 В, максимальный - до 600 А примерно при 60 В).

Электродвигатель, как видно из схемы, имеет одну сериесную обмотку С. Электротрансформатор относится к числу автоматических. Однако характеристика его совместной работы с приводным двигателем автобуса неблагоприятна: при небольшом увеличении сопротивления на ведущих колесах обороты приводного двигателя резко падают, а затем начинают возрастать, что отрицательно сказывается на условиях его работы.

На рисунке 1.4 показана конструкция объединенного ЭТ, примененного в двухпоточной автобусной передаче АСФ с продольным расположением машин. Здесь якорь первой (на рисунке - слева) машины связан с приводным двигателем, якорь второй - с солнечным колесом дифференциального зубчатого механизма ЭМП (см. рис. 1.5). Корпуса обеих машин жестко связаны между собой.

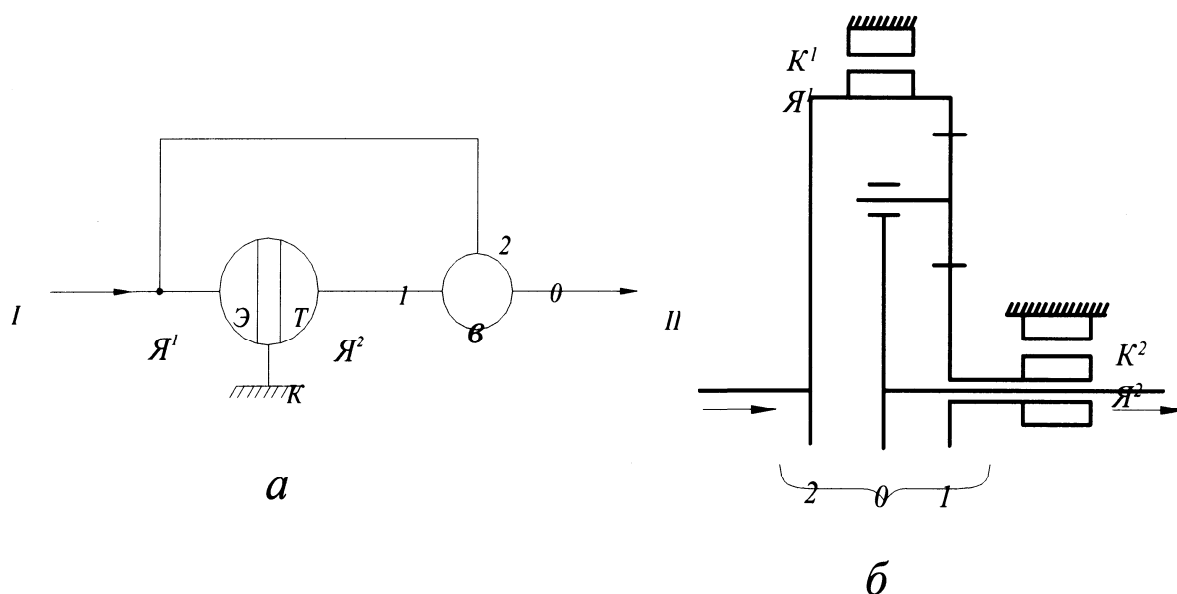


Рисунок 1.5 – Схема силового потока (а) и кинематическая схема (б) передачи АСФ

На рисунке 1.6 представлена конструкция дифференциального ЭТ автобусной передачи Ентца-Гроуна на 44,1 кВт так же с продольным расположением машин. Здесь обе машины с последовательным возбуждением имеют

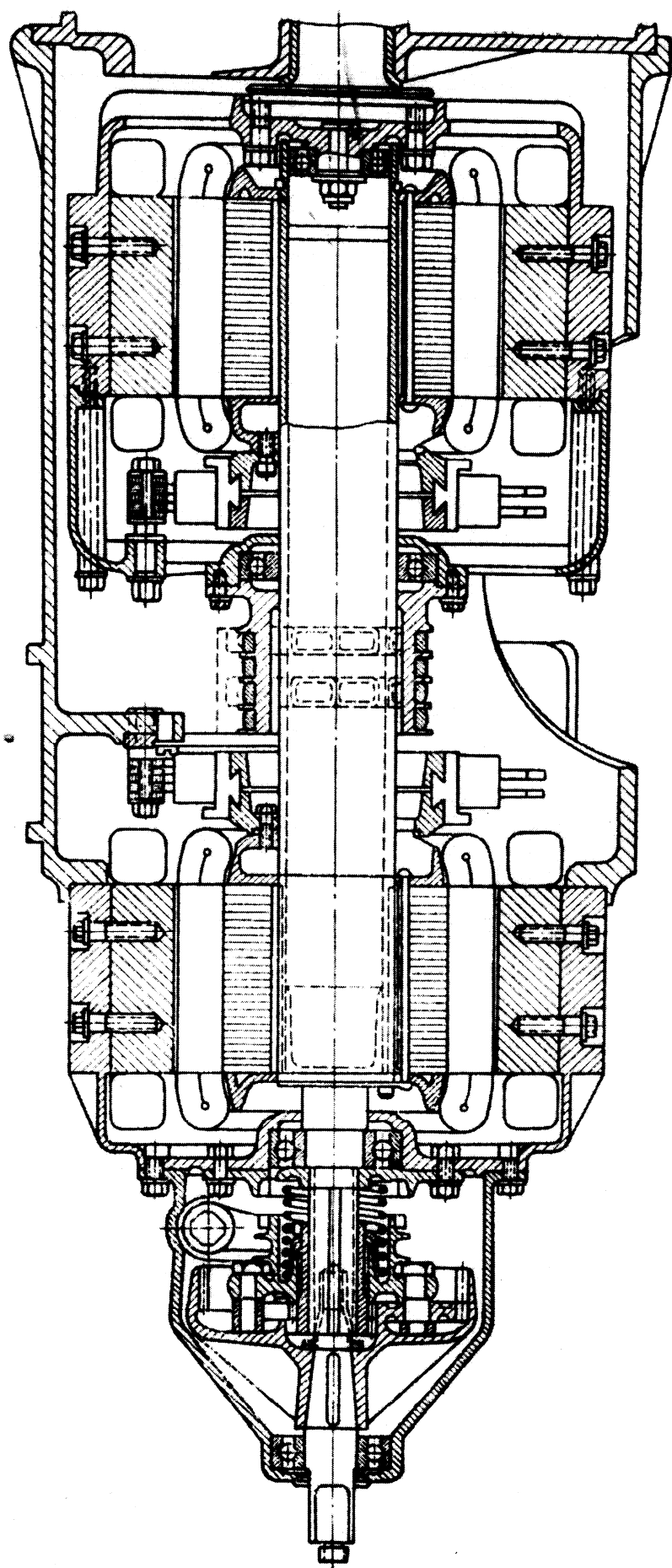


Рисунок 1.6 – Передача Ентца-Гроуна

общий якорь $Я_1 Я_2$ (см. рис. 1.7). Корпус первой машины связан с приводным двигателем, второй - неподвижен. Таким образом, первая машина - двойного вращения, вторая - обычная. Редуктор P (в силовом потоке не показан) выполняет функции реверса.

В дифференциальном ЭТ в электрическую энергию превращается лишь часть механического потока, а именно

$$N_{\text{э}} = -M_1(\omega_1 - \omega_2). \quad (1.1)$$

Поэтому при постоянстве режима приводного двигателя ($M_1 = \text{const}$, $\omega_1 = \text{const}$ - непрозрачная характеристика) по мере разгона автомобиля доля электрической мощности уменьшается.

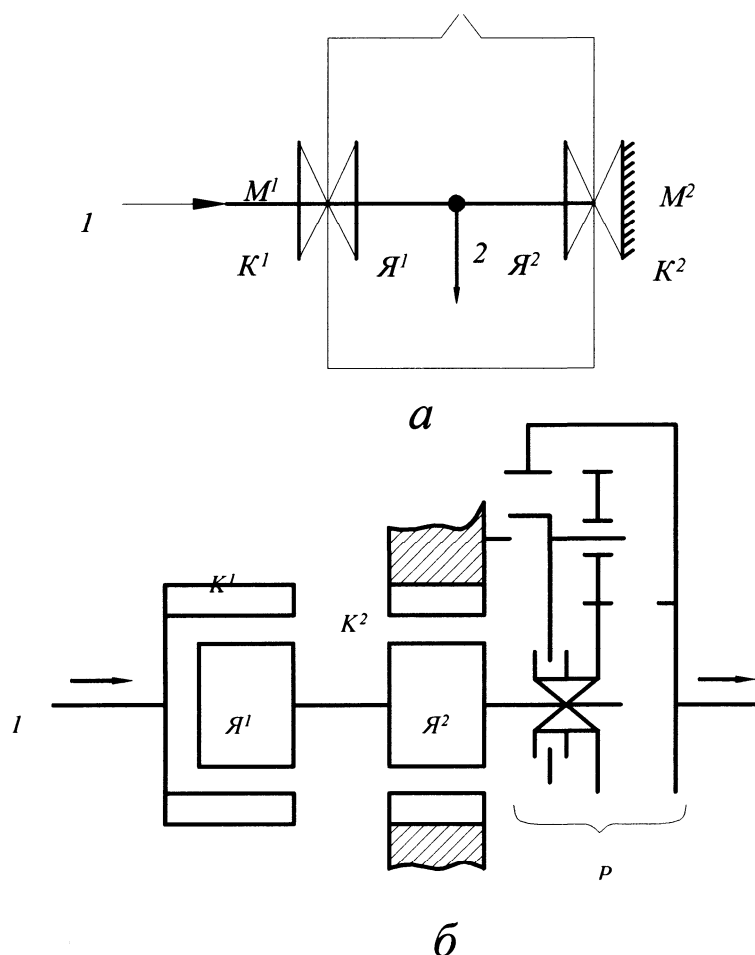


Рисунок 1.7 – Схема СП и кинематическая схема передачи Энтца-Гроуна

При ω_2 , близком к ω_1 , передача может работать в режиме муфты ($M_2 = -M_1$) или блокироваться механически, что обеспечивает ей высокий к. п. д. Максимальный КПД передачи Энтца-Гроуна достигал 0,92. Однако ЭТ имел малую приспособляемость (около двух).

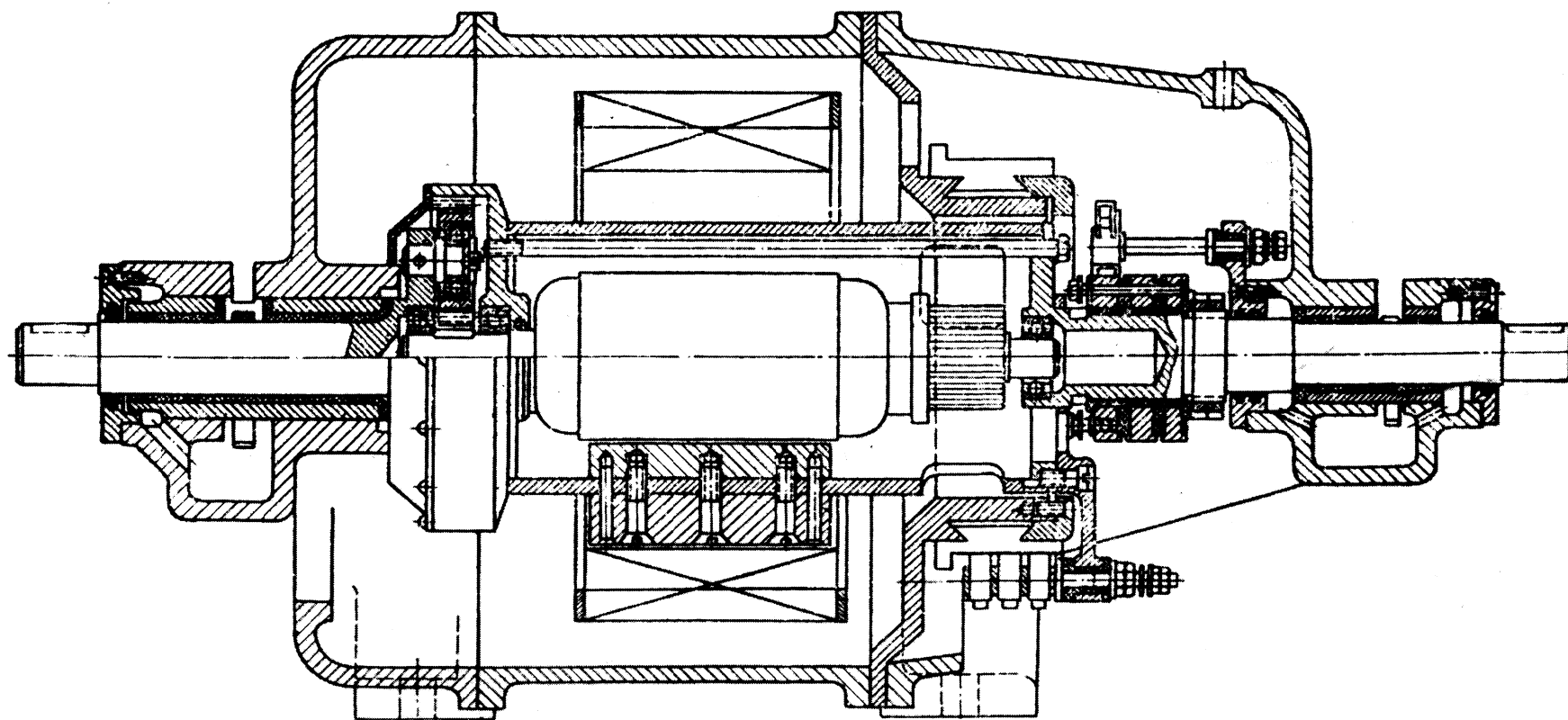
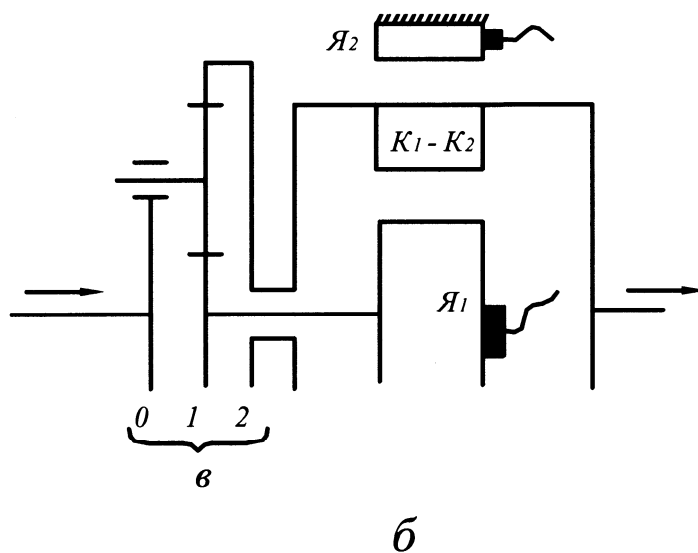


Рисунок 1.8 – Дифференциальный электротрансформатор С. П. Лебедева и Н. Е. Голубкова

Коаксиальные ЭТ при сокращении длины имеют большие радиальные размеры, что препятствует их применению, особенно при больших мощностях.



Коаксиальные ЭТ при сокращении длины имеют большие радиальные размеры, что препятствует их применению, особенно при больших мощностях.

Как следует из приведенного краткого обзора, объединенные ЭТ применяются преимущественно при дифференциальных и многопоточных схе-

мах (ЭМП). В обычных ЭП преимущество отдают дистанционным ЭТ, обеспечивающим удобство компоновки.

Многоприводные электротрансформаторы. Эти ЭТ по самому характеру являются дистанционными. В них генератор монтируется возможно ближе к приводному двигателю и может даже устанавливаться с ним в одном блоке. Электродвигатели в свою очередь монтируются в непосредственной близости от потребителей механической энергии – ведущих осей или колес автомобиля (прицепа).

В этих условиях основным требованием к электродвигателям является обеспечение минимальных габаритов, с тем, чтобы их размещение не создавало конструктивных и компоновочных трудностей.

Наилучшим способом реализации этого требования служит применение высокооборотных электродвигателей. Для получения необходимой скорости вращения колеса требуется установка между ним и электродвигателем редуктора с достаточно большим передаточным числом. Редуктор наряду с самим двигателем является одним из основных конструктивных элементов мотор-колеса (мотор-оси). Преимущественным применением пользуются простые двухрядные или планетарные редукторы. Последние особенно компактны и экономичны даже при больших передаточных числах.

На рисунке 1.10 представлена конструкция мотор-колеса фирмы «Летурно» со встроенным в неподвижный кронштейн электродвигателем, двухрядным простым редуктором (эпициклическое колесо которого повернуто к ступице автомобильного колеса) и электромагнитным стояночным тормозом (служебное торможение осуществляется переводом двигателя в генераторный режим).

Для уменьшения модулей зубчатых колес и снижения радиальных нагрузок редуктор выполнен с разветвленным потоком при двух параллельных блоках промежуточных колес.

Фирма «Летурно» выпускает мотор-колеса трех типоразмеров, создавая на их основе разнотипные машины вплоть до многозвенных активных поездов грузоподъемностью 150...200 т.

Аналогичную конструкцию имеет мотор-колесо ВНИИ Стройдормаша, но у него корпус электродвигателя не используется как несущий элемент для колеса, что следует считать недостатком конструкции.

Несколько иначе выполнено мотор-колесо фирмы «Дженерал Электрик» (см. рис. 1.11). Здесь корпус двигателя непосредственно служит осью колеса, а картер редуктора вынесен за пределы колеса и лишь ведущая шестерня второго ряда расположена консольно и входит в зацепление с венцом ступицы колеса. Стрелками на рисунке показано движение воздуха, охлаждающего двигатель.

Соединение двигателей. В многоприводных ЭТ возможны три варианта электрического соединения двигателей (Д) между собой и с генератором (Г) (см. рис. 1.12): последовательное (а), параллельное (б), смешанное (в). Третий вариант можно рассматривать как наиболее общий.

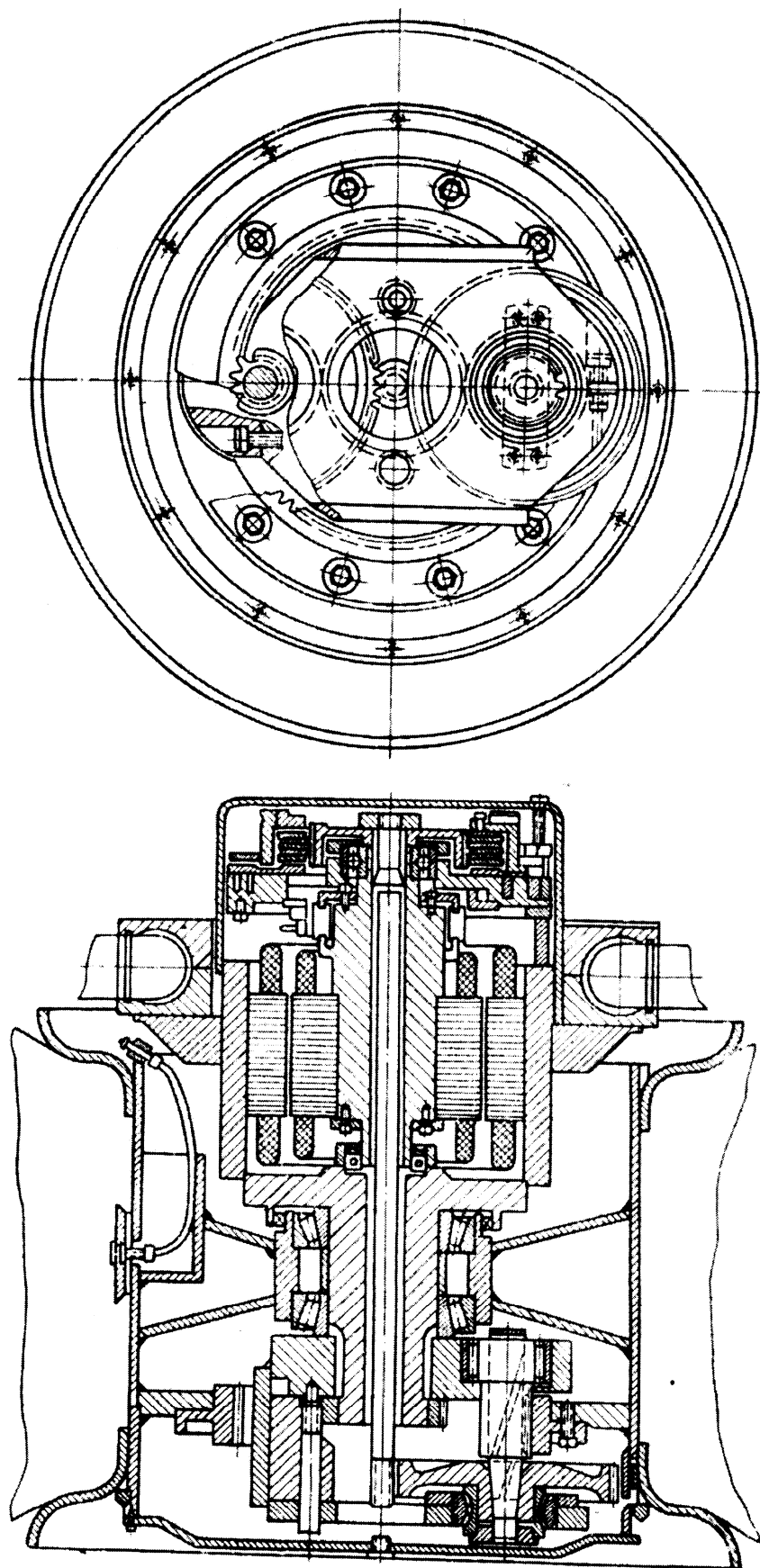


Рисунок 1.10 – Мотор-колесо фирмы «Летурно»

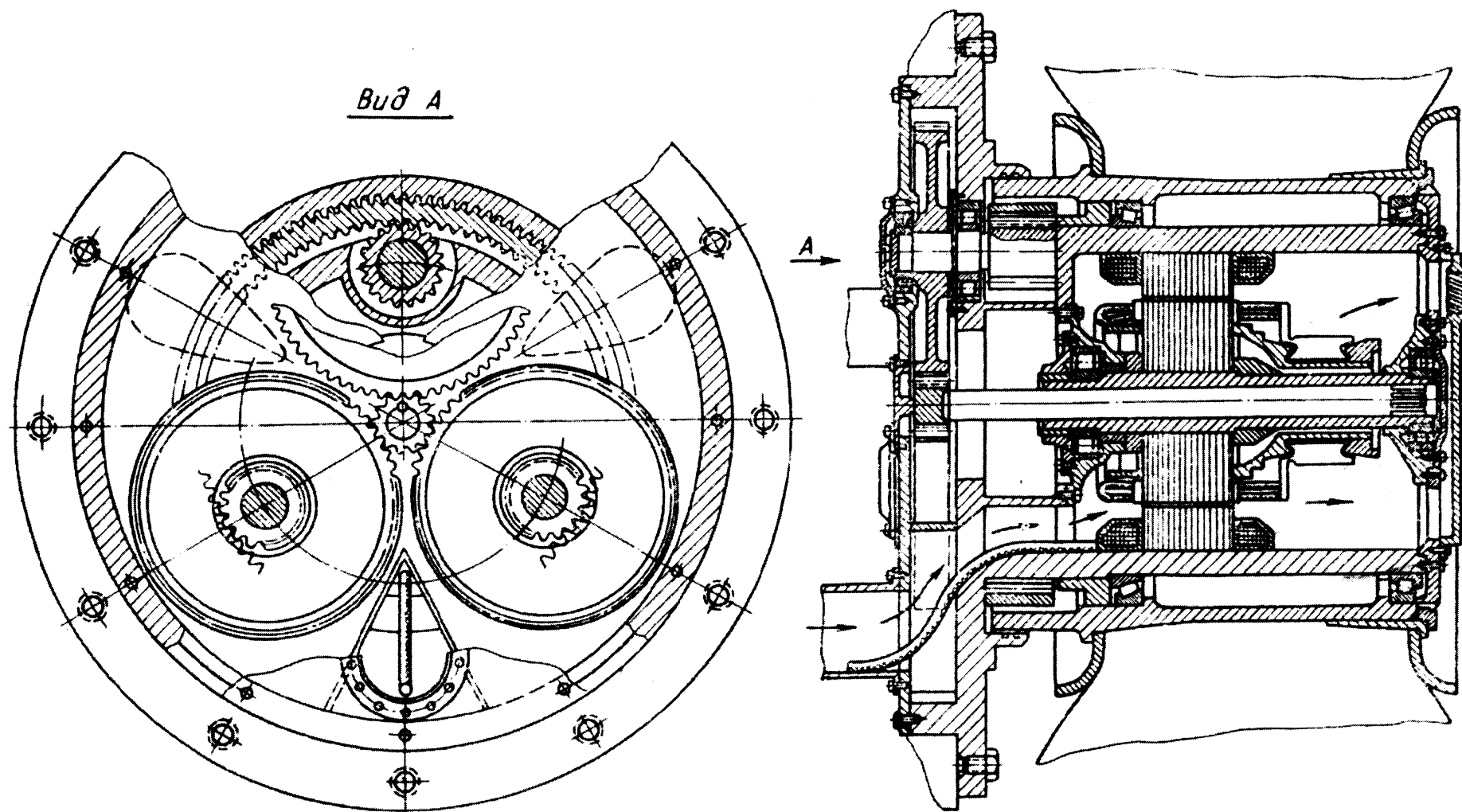


Рисунок 1.11 – Мотор-колесо фирмы «Дженерал Электрик»

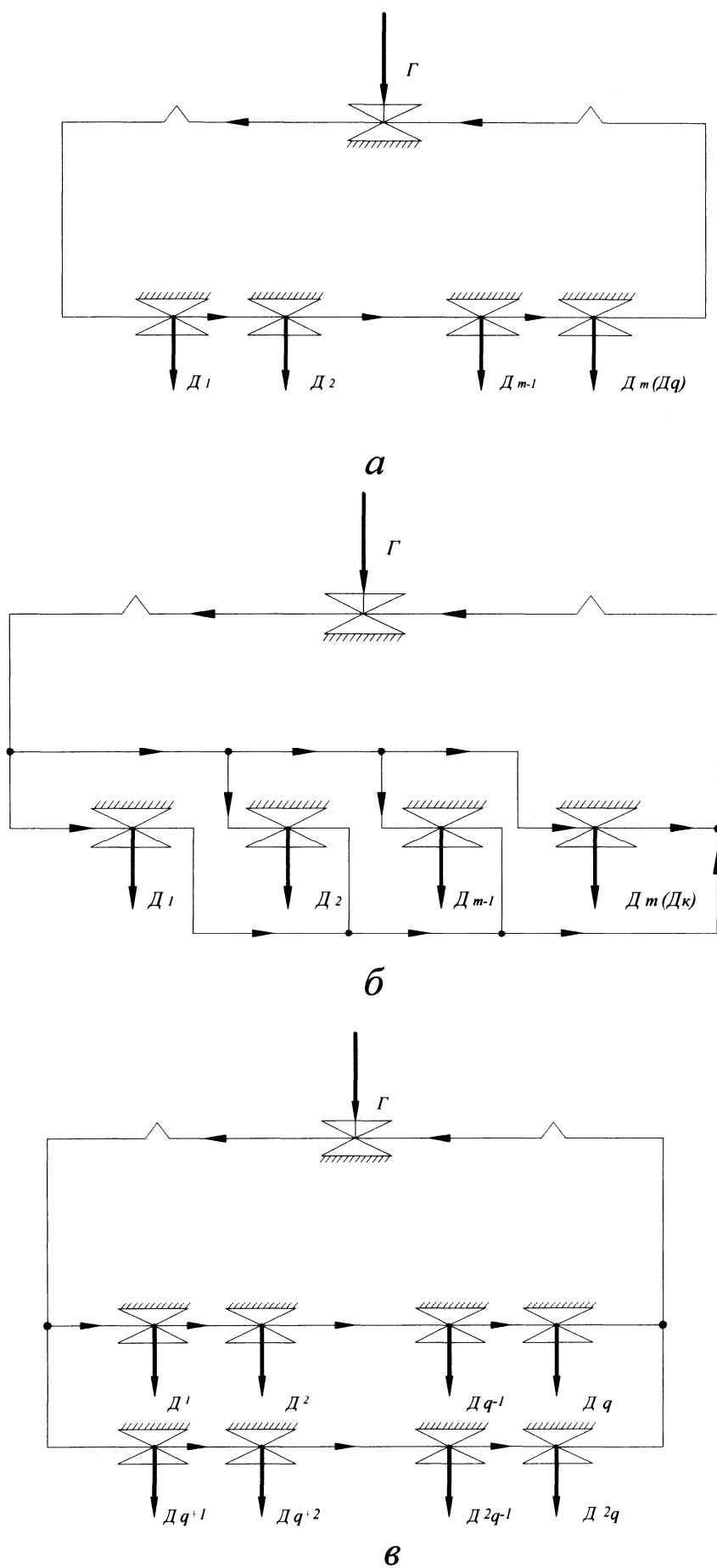


Рисунок 1.12 – Типы электрических соединений двигателей:
a – последовательное; *б* – параллельное; *в* – смешанное

Если общее число одинаковых двигателей m объединено в k параллельных групп по q двигателей в каждой, то ток и напряжение будут:

$$\left. \begin{aligned} I_{Г.Р} &= kI_{Д.Р}; \\ \varphi_{Г.Р} &= q\varphi_{Д.Р}; \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

В первом варианте $k = 1$, $q = m$; во втором $q = 1$, $k = m$. Здесь индекс «р» указывает на то, что параметры являются расчетными.

Для улучшения условий регулирования ЭТ целесообразно делать схему соединения не постоянной, а с помощью переключающих устройств изменять ее в зависимости от условий движения. Так, при малых скоростях движения автомобиля, когда требуются большие крутящие моменты на ведущих колесах, наиболее выгодно последовательное соединение, где сила тока одинакова во всей цепи и максимальна. Для получения высоких скоростей следует повысить напряжение на щетках двигателей, применив параллельную схему. Смешанная схема служит переходной и обеспечивает средние скорости движения автомобиля. Контактные системы, позволяющие переходить, от одной схемы к другой, рассматриваются в специальной литературе.

Глава 2 Электромеханические передачи

Последовательные передачи. Как указывалось, последовательная передача состоит из ЭТ и дополнительной фрикционно-зубчатой коробки передач. Электротрансформатор в этой передаче рассчитывается на полную мощность приводного двигателя. Диапазон дополнительной коробки и число ступеней в ней определяются так же, как в последовательной гидромеханической передаче.

Двухпоточные передачи типа РМ. В двухпоточной передаче этого типа разветвляющая УТ-я находится на входе, а распределяющая механическая (суммирующая) точка в, описывающая дифференциальный механизм, – на выходе (см. рис. 1.2 в и рис. 1.5).

Основные особенности передачи типа РМ, справедливы и для электро-механической. В частности, при непрозрачной характеристике ($\omega_d = \omega_1 = \text{const}$) обороты якоря первой машины постоянны, второй – линейно зависят от скорости ω_{II} (пропорциональной скорости автомобиля). При некоторой скорости $\omega_{II} = \omega_v$, зависящей от передаточного числа суммирующей точки в, якорь второй машины останавливается. Вся мощность передается механическим путем, точка в работает как редуктор.

При скоростях $\omega_{II} < \omega_v$ в отличие от необратимого гидродинамического трансформатора ЭТ работает с обращением, т. е. машина 2 становится генератором, машина 1 – двигателем.

Обращение электротрансформатора обеспечивается изменением знака угловой скорости якоря машины 2 и знака момента на якоре машины 7. Для этого в системе регулирования необходимо изменить направление магнитного потока, создаваемого обмотками возбуждения этой машины. Действительно

$$M_i = C_i \Phi_i I_i, \quad (2.1)$$

где C_i – постоянная машины;
 Φ_i – магнитный поток;
 I_i – ток якоря.

Так как направление тока не меняется, следует изменить знак Φ_i . Использование обращения расширяет диапазон электротрансформатора. Нагрузка на электротрансформатор (доля мощности, передаваемой электрическим путем) равна отношению моментов

$$\xi_T = \frac{M_{я_1}}{M_1}. \quad (2.2)$$

Она растет с увеличением скорости, начиная с $\omega_u = \omega_{ex}$ и достигает максимума при $\omega_{II} < \omega_I$.

В передаче АСФ электротрансформатор рассчитан на 25% мощности приводного двигателя. При этом рабочий диапазон электротрансформатора (с учетом обращения) – около четырех.

2.1 Двухпоточные передачи типа МР

В этих передачах (см. рис. 1.2 г) механическая распределяющая УТ расположена на входе, а разветвляющая – на выходе.

В отличие от передачи типа РМ при непрозрачной характеристике момент на якоре первой машины постоянен при любой скорости автомобиля, а обороты якоря убывают с возрастанием скорости. Вместе с ней падает и доля мощности, передаваемой электрическим путем.

Наибольшая электрическая мощность передается при разгоне, а при установившемся движении КПД передачи повышается; возможна блокировка передачи.

Если передача не блокируется, то при некотором $\omega_{II} = \omega_a > \omega_I$ ($i < 1$) произойдет обращение электротрансформатора: якорь первой машины остановится и начнет вращаться в обратную сторону, а сама машина превратится из генератора в двигатель. У второй машины, которая становится генератором, изменится знак момента на якоре.

На рисунке 1.8 была показана конструкция двухпоточной передачи С. П. Лебедева и Н. Е. Голубкова, относящейся к типу МР с дифференциальным трансформатором, а на рисунке 1.9 - ее кинематическая схема и схема СП; последний развернут, т. е. обе машины электротрансформатора описаны кинематическими точками. Направление силовых потоков показано при $i > 1$. Из схемы видно, что как внешние (в передаче), так и внутренние (в электротрансформаторе) потоки разветвленные, следовательно, циркуляция отсутствует.

Относительная мощность электрического потока в этой передаче определяется из выражения

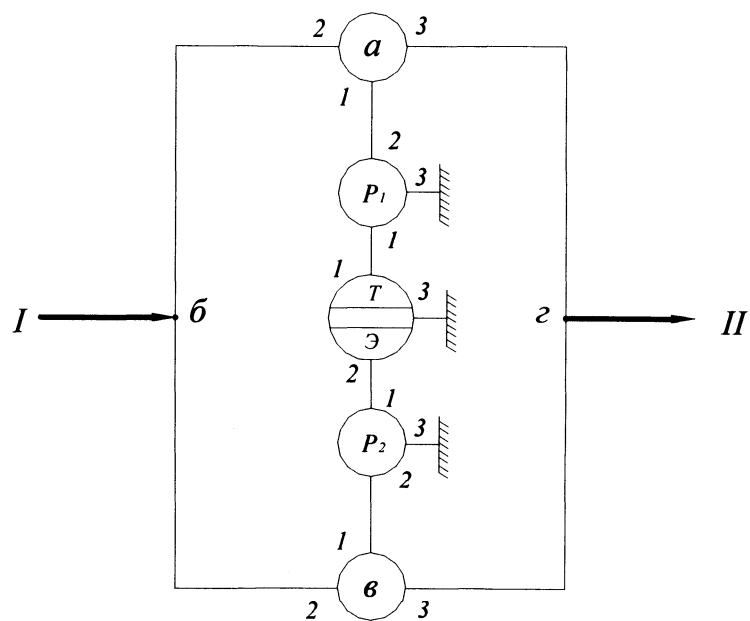
$$\xi_{\varepsilon} = 1 - \frac{1}{i} \quad (2.3)$$

где i - передаточное число всей передачи.

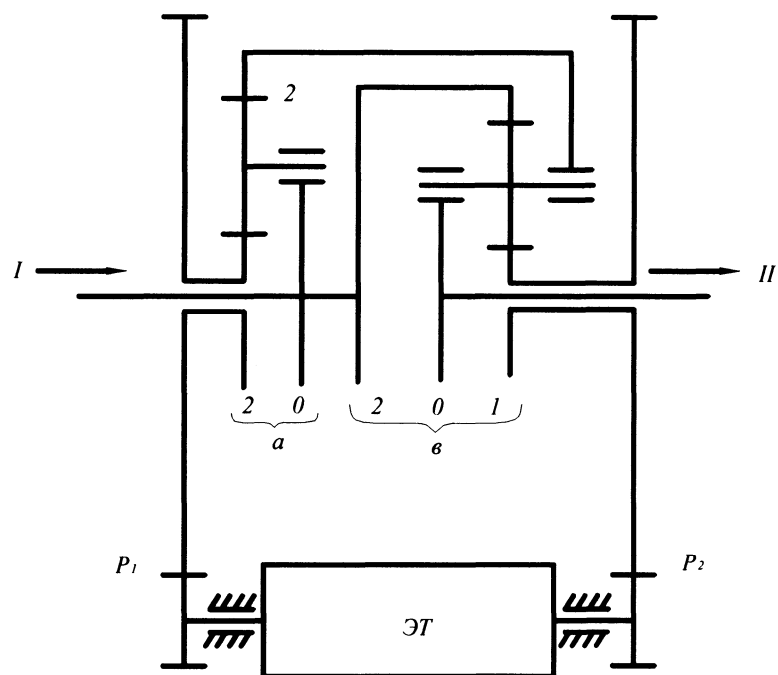
Из формулы видно, что при i , близких к единице, электрическая мощность невелика, но при больших передаточных числах в начале разгона она может быть очень значительной (до 0,7...0,8).

2.2 Трехпоточные передачи

В трехпоточной передаче, схема СП и кинематическая схема которой показаны на рисунке 2.1, электротрансформатор находится между двумя механическими распределяющими точками (дифференциалами) a и b .



a



б

Рисунок 2.1 – Схема СП и кинематическая схема трехпоточной передачи

Редукторы P_1 и P_2 служат для соединения валов этих дифференциалов с якорями электрических машин; если электротрансформатор коаксиальный, редукторов может и не быть.

Как видно из схемы, трехпоточная передача сочетает в себе свойства обеих двухпоточных. Поэтому она позволяет получить не одно, а два обра-

щения электротрансформатора: первое - при большой скорости выходного вала ($i < 1$), когда в обратную сторону начинает вращаться якорь первой машины, второе - при малой ($i > 1$), когда меняет направление якорь второй машины.

На рисунке 2.2 показаны направления потоков и знаки их факторов для точек *a* и *в*. Рисунок 2.2 *а* соответствует основному режиму (когда генератором служит первая машина), рисунок 2.2 *б* – первому (при больших скоростях), рисунок 2.2 *в* – второму (при малых скоростях) дополнительным режимам, при которых электротрансформатор обращен.

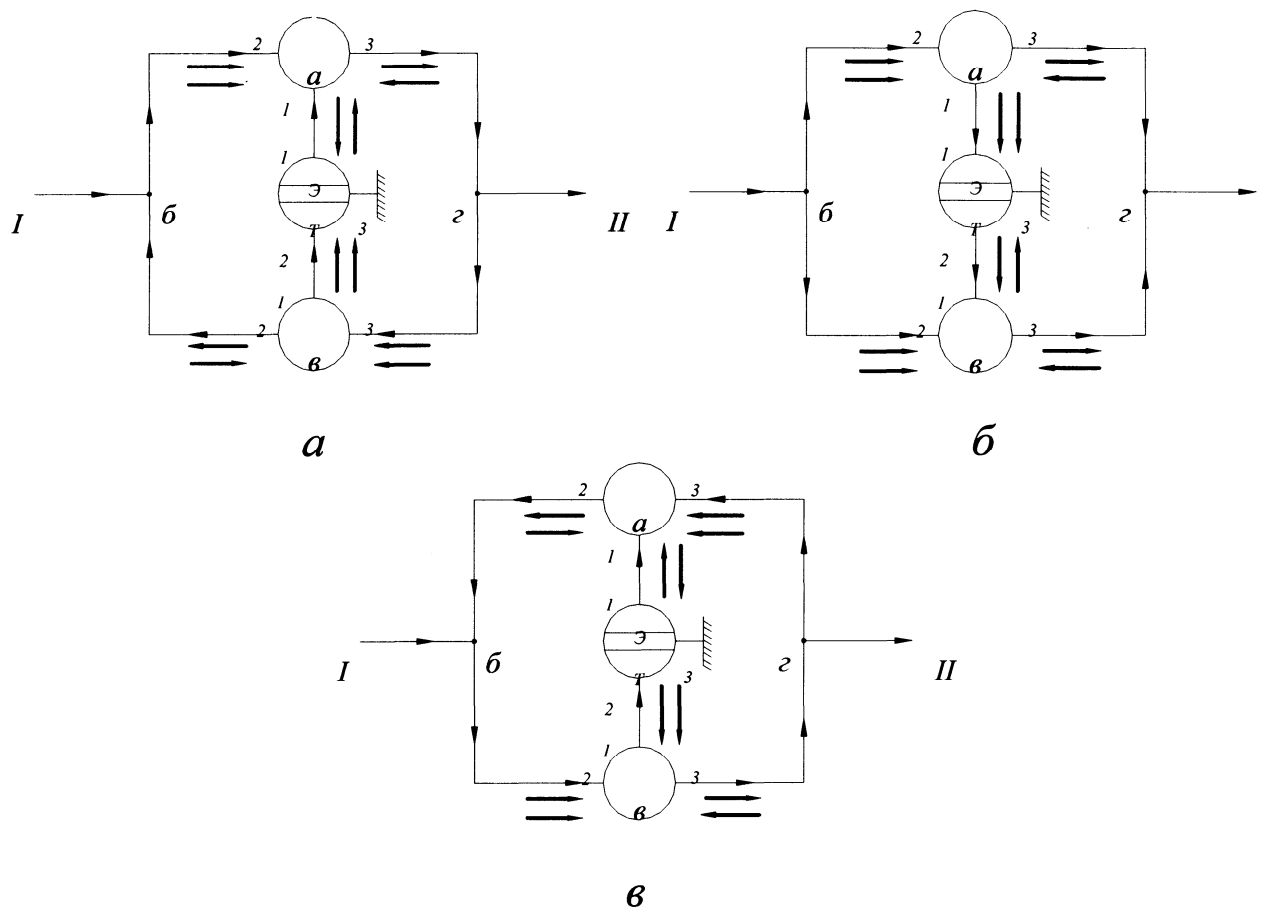


Рисунок 2.2 – Режимы работы трехпоточной передачи

Использование двух обращений позволяет значительно расширить диапазон передачи без увеличения нагрузки электротрансформатора.

Основной диапазон ЭМП, осуществляемый без обращения электротрансформатора, равен для идеальной непрозрачной передачи

$$d_0 = \left(\frac{1 + \varepsilon_{T_{\max}}}{1 - \varepsilon_{T_{\max}}} \right)^2 \quad (2.4)$$

где $\xi_{T_{\max}}$ - максимальная нагрузка ЭТ.

Например, при $\xi_{T\max} = 0,3$ $d_0 \approx 3,5$. Использование обоих дополнительных режимов позволяет расширить диапазон до 5,8, т. е. более чем на 60%.

Однако к машинам ЭТ трехпоточной передачи предъявляются особые требования, поскольку они должны обращаться, реверсироваться и работать в весьма широком интервале скоростей и моментов. Представление об условиях их работы дает график необходимой характеристики электротрансформатора, выполненный для идеальной непрозрачной передачи (см. рис. 2.3). Поэтому хороших результатов можно добиться лишь при условии, что электрические машины и системы их регулирования для электротрансформаторов трехпоточных передач будут специально изготавливаться по строго рассчитанным характеристикам, а не подбираться из существующих.

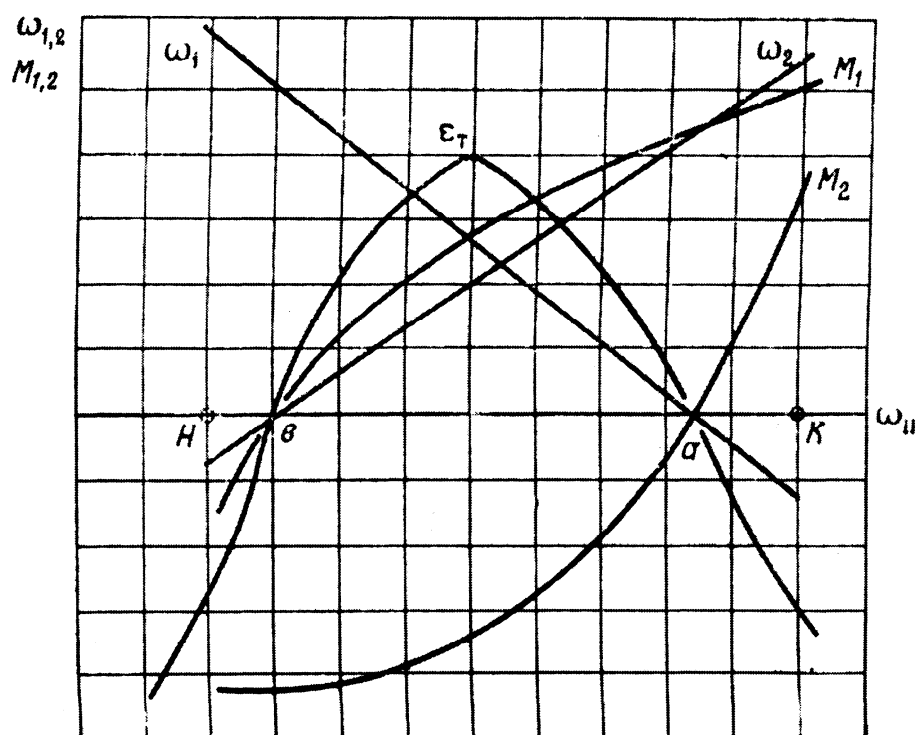


Рисунок 2.3 – Необходимая характеристика электротрансформатора трехпоточной передачи

2.3 Комбинированные ЭМП

Комбинированной называется передача, сочетающая непрерывное и ступенчатое регулирование. Применение комбинированных передач имеет целью расширить общий диапазон или осуществить отбор мощности от обеих электрических машин трансформатора, не используемых на режимах ступенчатого регулирования. Последняя возможность представляет особый интерес, так как позволяет частично восстановить дистанционность передачи, утраченную в многопоточных схемах.

На рисунке 2.4 представлена схема СП трехпоточной комбинированной передачи. Последняя имеет три ступени, из которых только одна – непрерывного регулирования, осуществляемая включением муфты Н и электротрансформатора ЭГ.

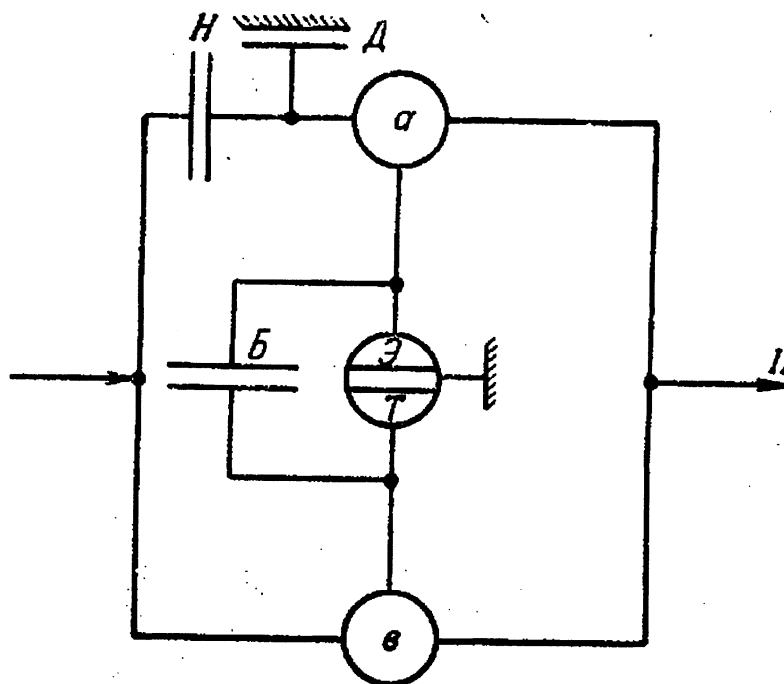


Рисунок 2.4 – Схема СП трехпоточной комбинированной передачи

Две другие ступени - прямая и замедленная - включаются соответственно муфтами Н, Б или тормозом Д и муфтой Б. Поскольку муфта Б блокирует электротрансформатор, машины последнего на этих двух ступенях могут быть либо обесточены, либо обе работать в генераторном режиме, отдавая электрическую энергию на питание дополнительных потребителей. Так, на замедленной ступени мощность к ведущим колесам тягача (к основному ведущему мосту многоприводного автомобиля) может подводиться механическим путем от потока II , а к мотор-колесам прицепа (дополнительным ведущим мостам) - электрическим путем от машин электротрансформатора.

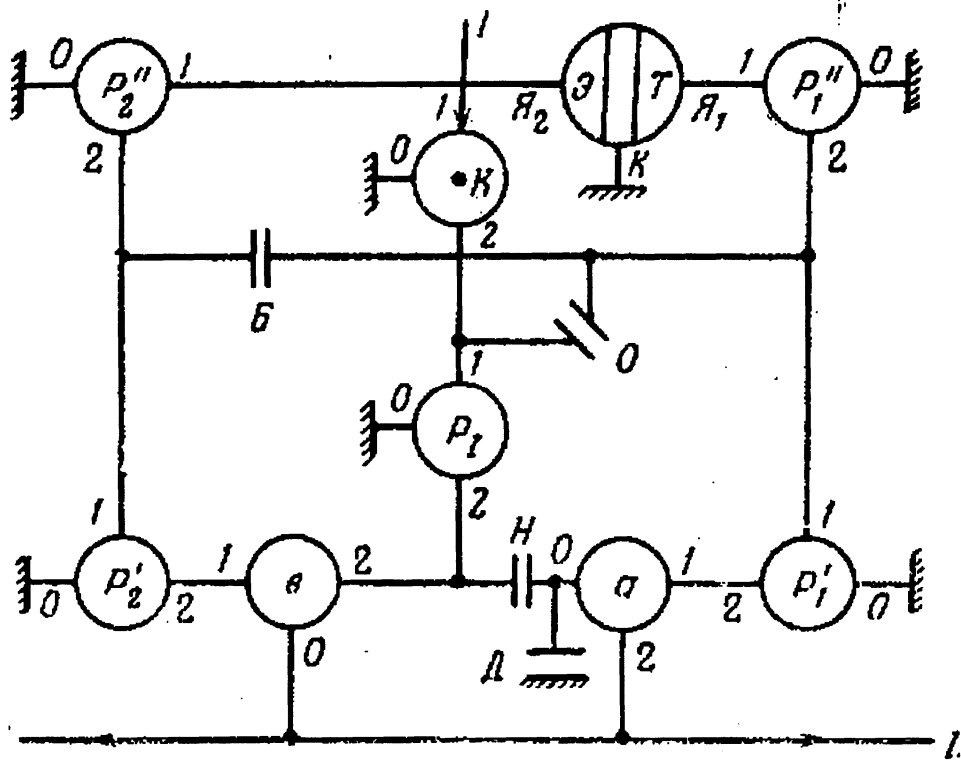
Поскольку обе машины работают как генераторы, суммарная мощность может быть равна удвоенной расчетной мощности ЭГ. Так, при $\xi_{T \max} = 0,3$ электрическим путем можно будет отбирать до 60% мощности приводного двигателя.

На рисунке 2.5 показаны схема СП и схема трехпоточной комбинированной ЭМП, построенной для машины с двигателем 80,85 кВт. Механический узел передачи в основном выполнен по схеме, показанной на рисунке 2.4, отличаясь только наличием ряда дополнительных компоновочных редукторов и муфты О, обеспечивающей механическую ступень обратного хода.

Конструкция передачи показана на рисунке 2.6. Здесь 2, 12 и 18 – составной картер механического узла; 9 – ведомый вал конической передачи (К на рис. 17); 4, 5, 8, 11 и 13 – шестерни; 6 и 10 – валы. Ведомый вал 16 переда-

ет мощность на механизмы поворота 1.

Дифференциалы 14 (УТ-я) и 19 (УТ-е) связаны между собой соединительным валом 17 и двойной муфтой 15, описываемой УТ-Н и УТ-Д. Двойная муфта 7 описывается УТ-Б и УТ-О.



a

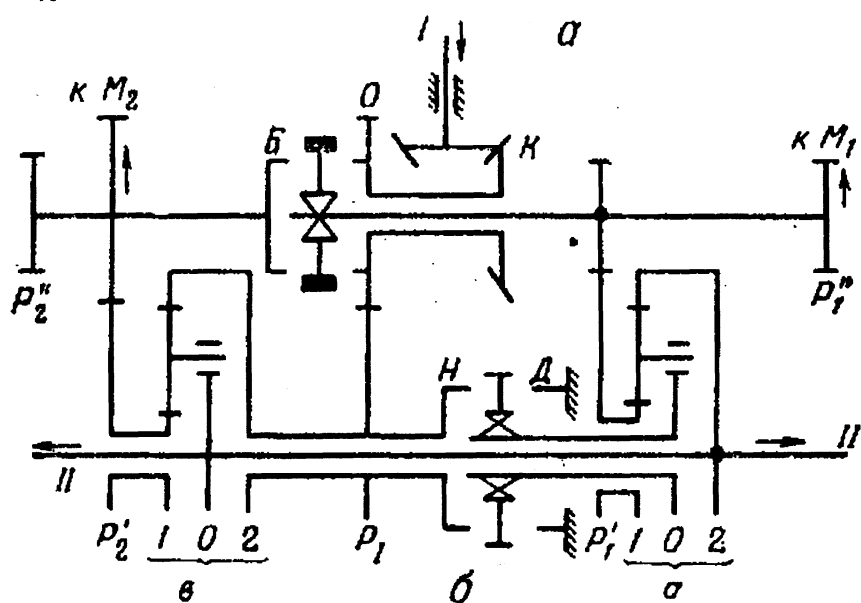


Рисунок 2.5 – Схема СП (а) и кинематическая схема трехпоточной комбинированной передачи (б)

В качестве главных машин 3 ЭТ использованы быстроходные авиационные генераторы ГСР-18000 мощностью 18 кВт.

Максимальная нагрузка ЭТ $\xi_{T_{\max}}=0,18$, основной диапазон передачи $d_0=2,1$, полный диапазон непрерывного регулирования $d=3,2$, полный диапазон передачи с учетом замедленной ступени - около 8. Вес передачи около 400 кг, или 4,9 кг/кВт; серийная механическая передача весит около 300 кг.

Недостатком этой передачи, как и вообще трехпоточных передач, является трудность обеспечения необходимых характеристик электромашин. Здесь особые затруднения создает работа электротрансформатора в режимах обращения (точки *a*, *b* на идеальной характеристике), так как трудно обеспечить удовлетворительное и устойчивое действие машин при весьма малых оборотах их якорей. Возможным решением здесь может быть ступенчатый (скачкообразный) переход от основного к дополнительному режиму и обратно, минуя участок малых оборотов якоря.

Многопоточные ЭМП, в частности комбипропанные, подобно аналогичным гидрообъемным передачам весьма перспективны для тяжелых и многоприводных автомобилей, а также для активных поездов.

2.4 Принципы регулирования электротрансформатора

Регулирование ЭТ представляет собой сложную специальную задачу, решение которой связано с выбором и расчетом схемы регулирования и подбором ее основных элементов. Детальное рассмотрение этих вопросов выходит за пределы данного курса. Поэтому мы изложим лишь общие принципы регулирования ЭТ применительно к одноприводной схеме; переход к многоприводной с учетом рассмотренных выше возможных соединений электродвигателей существенных затруднений не вызывает. Будем в первом приближении считать передачу непрозрачной и идеальной.

Задачей регулирования является обеспечение необходимой характеристики ЭТ во всем диапазоне непрерывного регулирования.

Необходимая характеристика дает зависимость факторов силовых потоков входа и выхода ЭТ от скорости выходного потока передачи, пропорциональной скорости движения автомобиля.

Вид необходимой характеристики зависит от типа передачи и параметров ее механизмов. Характеристика для трехпоточной передачи была показана на рисунке 2.3. Для однопоточной передачи при принятых допущениях $\omega_1=1$, $M_1=1$, $\omega_2=\omega_H$, $M_2= -\frac{1}{\omega_H}$ (идеальная гиперболическая характеристика в относительных величинах).

Факторы необходимой характеристики определяются из уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \omega_I &= a\omega_I - (a-1)\omega_{II}; \\ \omega_I &= \epsilon\omega_I - (\epsilon-1)\omega_{II}; \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{(\epsilon-1) - \frac{\epsilon\omega_I}{\omega_{II}}}{a-\epsilon} M_I \\ M_2 &= \frac{(a-1) - \frac{a\omega_I}{\omega_{II}}}{a-\epsilon} M_I \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Здесь a и ϵ - обобщенные передаточные числа распределяющих точек:
 $a = i_{12a}^{(3)}$, $\epsilon = i_{12\epsilon}^{(3)}$ (см. рис. 2.2); индексы «я» для упрощения опущены.

Если желательно получить характеристику в относительных величинах (при исследовании передачи), то следует принять $\omega_I = 1$, $M_I = 1$, тогда $N_I = 1$.

Формулы (2.5) и (2.6) выведены для трехпоточной передачи, но они справедливы и для всех других типов передач. Так, для двухпоточной передачи типа РМ следует принять $a = 1$, для передачи типа МР – $\epsilon = 0$ и для последовательной (однопоточной) передачи $a = 1$ и $\epsilon = 0$.

Если заданы скорости входа и выхода ω_I , ω_{II} , необходимые скорости якорей ω_I и ω_{II} будут обеспечены самими распределяющими точками, поскольку передача имеет две степени свободы.

Необходимые моменты M_1 и M_2 могут быть получены при соответствующих факторах электрического потока, как это следует из уравнения (2.1):

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= C_1 \Phi_1 I_1; \\ M_2 &= C_2 \Phi_2 I_2; \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Таким образом, моменты якорей можно изменять, меняя магнитные потоки и ток якоря.

Так как в одноприводной схеме $I_1 = -I_2 = 1$ то, приняв $C_1 = C_2$, получим коэффициент трансформации

$$k_T = -\frac{M_2}{M_1} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \quad (2.8)$$

Регулирование идеального непрозрачного электротрансформатора возможно только изменением магнитных потоков его электрических машин.

Желательно, чтобы величина тока оставалась постоянной; это обеспечивает, в частности, постоянство омических потерь в электротрансформаторе.

Закон изменения магнитных потоков получим, приравняв правые части уравнений (2.7) и (2.8).

Из уравнений следует, что при $\omega_1 = \text{const}$, $M_1 = \text{const}$ и $I = \text{const}$ магнитные потоки должны иметь постоянную и переменную составляющие, причем последняя находится в обратной зависимости от скорости выхода ω_{11} .

Решение этой задачи возможно с помощью специальных вспомогательных электромашин-возбудителей (машинное регулирование) или регулирующей аппаратуры (аппаратное регулирование). В последнем случае могут быть использованы быстродействующие счетно-решающие устройства, реагирующие на изменение ω_{11} (а также ω_1 и M_1) и выдающие программу изменения магнитных потоков.

Поскольку при изменении M_1 (уменьшении нагрузки приводного двигателя), как правило, требуется не изменение коэффициента трансформации, а уменьшение выходного момента M_{11} , возможно (часто и целесообразно) в соответствии с выражениями (2.8) уменьшать не магнитные потоки, а токи якоря.

Изменение угловой скорости входа от (оборотов приводного двигателя) при постоянной нагрузке M_1 требует изменения переменной составляющей магнитного потока.

Всякий трансформатор, в том числе и ЭТ, целесообразно делать непрозрачным, с тем, чтобы приводной двигатель работал на одной наиболее экономичной точке своей характеристики (или в узкой области режимов). При этом конечно приспособляемость приводного двигателя не используется. Если же отказаться от непрозрачности ЭТ, то система регулирования может быть значительно упрощена, как это сделано, например, в электропередаче автобуса ЗИЛ-154 (см. рис. 1.3), где в основном факторы силового потока изменяются автоматически благодаря серийной характеристике двигателя. Однако отход от необходимой характеристики приводит к нарушению рациональных условий совместной работы электропередачи с двигателем, что, как упоминалось, было одной из основных причин снятия автобуса ЗИЛ-154 с производства.

2.5 Порядок расчета электрических и электромеханических передач

Исходные данные для предварительного (проектного) расчета ЭП и ЭМП берутся из тягового расчета автомобиля, как и при расчете всех типов силовых передач.

При расчете ЭП выбирается схема передачи – одноприводная или многоприводная; в последнем случае определяется также способ соединения электродвигателей.

Если электродвигатели подбираются из числа существующих, выбор производится по максимальной мощности, передаваемой данному потребителю (колесу или оси). Затем по паспортной характеристике электродвигателя и заданной скорости автомобиля определяется передаточное число редуктора и проверяется возможность и целесообразность его реализации. В противном случае берется другой электродвигатель.

Всегда желательно, если допускает нагрузка на колеса, иметь все двигатели одинаковые и взаимозаменяемые.

При выдаче задания на проектирование новых электродвигателей предварительно задаются их оборотами и уточняют последние по передаточному числу редуктора.

После окончательного выбора двигателей определяют расчетные параметры генератора – напряжения и токи – с учетом способа соединения двигателей и производят подбор генератора (или выдают задание на его проектирование).

Если обороты выбранного генератора и приводного электродвигателя не совпадают, между ними устанавливается повышающий или понижающий (согласующий) редуктор.

В заключение выбираются тип и схема регулирования и производится ее расчет на основании необходимой характеристики электротрансформатора, составляемой по уравнениям (2.5) и (2.6).

Расчет последовательной ЭМП начинается с выбора диапазона непрерывного регулирования ЭТ; после этого обычными методами (как для ГМП) определяются диапазон дополнительной коробки и число ступеней в ней. Далее выбирается вид ЭТ – объединенный или дистанционный – и производится подбор и расчет электромашин (или выдается задание на их проектирование), как и для ЭП.

Расчет многопоточной ЭМП. Вначале выбирается тип передачи: число потоков, простая или комбинированная схема.

Для простой трехпоточной передачи задаются максимальной нагрузкой электротрансформатора и по формуле (2.4) находят основной диапазон передачи. Возможно и обратное решение: задавшись основным диапазоном, находят максимальную нагрузку.

Так как

$$d_0 = \frac{\omega_a}{\omega_6}, \quad (2.9)$$

то, задавшись $\omega_a > \omega_1$, определяют $\omega_6 < \omega_1$ (или наоборот). Далее, подставив $\omega_a = \omega_1$ в первое уравнение (2.5) и приравняв к нулю, находят аналогично из второго уравнения при $\omega_6 = \omega_{11}$ находят v . Таким образом, параметры дифференциалов будут известны.

По уравнениям (2.5) и (2.6) строится необходимая характеристика электротрансформатора, и подбираются (проектируются) электрические машины. Если необходимы согласующие редукторы, находят их передаточные числа; передаточные числа компоновочных редукторов выбираются по конструктивным соображениям.

Полный диапазон непрерывного регулирования определяется непосредственно из необходимой характеристики.

Двухпоточная ЭМП рассчитывается аналогично трехпоточной; для нее

$$d_0 = \frac{1}{1 - \xi_{T\max}} \quad (2.10)$$

При расчете комбинированной передачи дополнительно задают передаточное число замедленной ступени (i_M) и подбирают параметры a и b по этой величине, составляя соответствующие уравнения силового потока. Так, для схемы (см. рис. 2.5) имеем

$$\omega_a = \frac{i_M + d_0 - 1}{i_M} \quad (2.11)$$

после чего из формулы (2.9) находят ω_6 .

Поверочный расчет. После того как произведен проектировочный расчет и получен силовой поток передачи со всеми характеристиками его узловых точек, производится поверочный расчет.

Характеристика узловой точки электротрансформатора чаще всего будет построена в функции угловой скорости выходного вала электротрансформатора ω_2 . Задав ряд значений ω_2 и определив для каждого из них по характеристике ω_1 , M_1 и M_2 и находят факторы СП передачи по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \omega_I &= \frac{(b-1)\omega_1 + (a-1)\omega_2}{a-b}; \\ \omega_{II} &= \frac{b\omega_1 - a\omega_2}{a-b}; \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

$$\left. \begin{aligned} M_I &= aM_1 + bM_2; \\ M_{II} &= -[(a-1)M_1 + (b-1)M_2] \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Эти выражения получены из формул (2.5) и (2.6). При наличии редукторов их передаточные числа следует ввести в соответствующие уравнения.

Параметры входа сверяются с характеристикой электродвигателя. В случае соответствия строятся рабочая характеристика передачи и тягово-экономическая характеристика автомобиля, как и при ГМП.

При несоответствии электротрансформатора с электродвигателем следует, взяв семейство характеристик электротрансформатора, построить характеристику входа и лишь затем рабочую характеристику электротрансформатора.

При поверочном расчете тягово-экономическую характеристику надо строить не только для одного расчетного режима, но и для соседних с ним, учитывая, что в эксплуатации приводной двигатель обычно загружается на 60...80% своей номинальной мощности.

Глава 3 Электромеханические трансмиссии с мотор-колесами

3.1 Описание схемы электромеханической трансмиссии с мотор-колесами

Электромеханическая трансмиссия (ЭМТ) с мотор-колесами (МК) представляет собой последовательную (для каждого МК) однопоточную схему (см. рис. 3.1), где силовой поток направлен от первичного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) через генератор и преобразователь к МК.

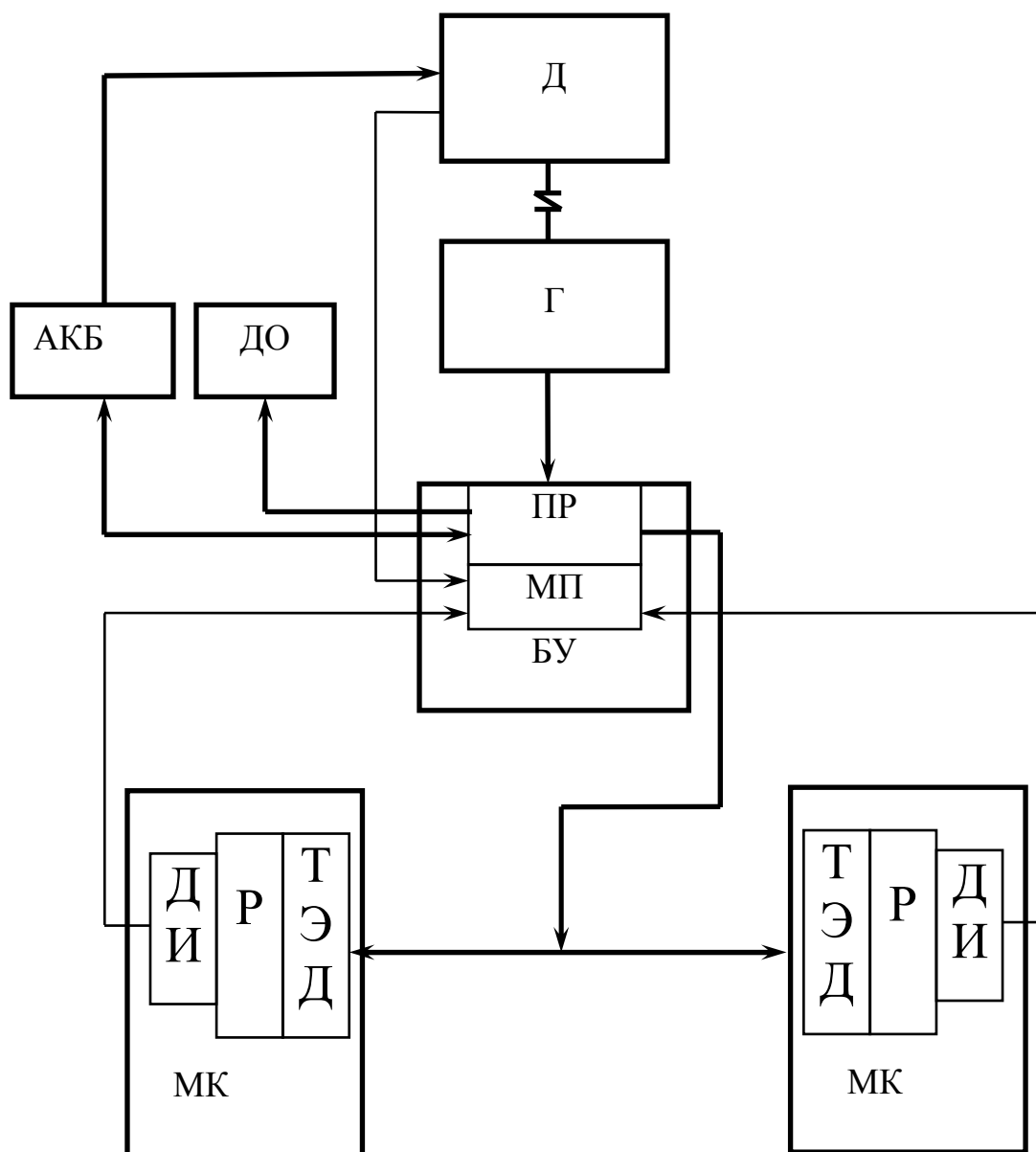


Рисунок 3.1 – Схема электромеханической трансмиссии:
Д - дизель; Г - генератор; АКБ – аккумуляторная батарея; ДО – дополнительное оборудование; БУ - блок управления, включающий силовой преобразователь (ПР) и микропроцессор (МП); МК - мотор-колесо, включающее тяговый электродвигатель (ТЭД), редуктор (Р) и датчик информации (ДИ).

————— - силовой сигнал; ————— - информационный сигнал.

В качестве первичного двигателя на колесном транспортном средстве (КТС) с ЭМТ может применяться дизельный двигатель, тягово-скоростные характеристики которого представлены на рисунке 3.2.

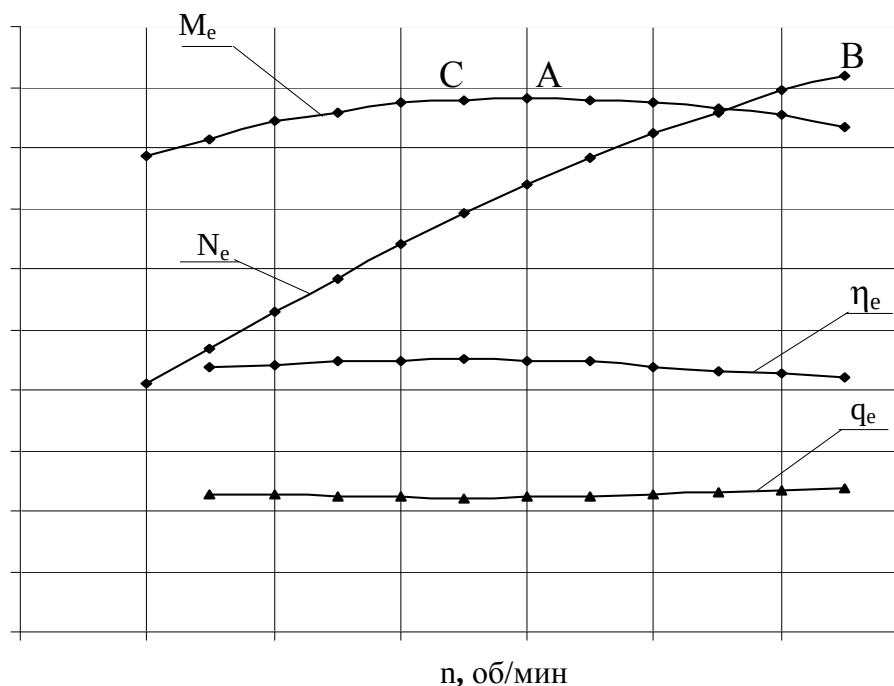


Рисунок 3.2 – Тягово-скоростные характеристики двигателя:
 M_e – характеристика момента; N_e – характеристика мощности;
 η_e – характеристика КПД; q_e – характеристика топливной экономичности

На характеристике момента (см. рис. 3.2) точка A соответствует максимальному крутящему моменту, а на характеристике мощности точка B – максимальной (номинальной) мощности дизеля. Максимальное значение КПД двигателя соответствует точке минимального удельного расхода топлива, которая, в свою очередь, соответствует среднему диапазону угловой скорости коленчатого вала и точке C на характеристике момента двигателя.

С точки зрения экономичности и экологичности работа ДВС в диапазоне моментной характеристики на участке AC наиболее предпочтительна, поэтому при расчете длительных эксплуатационных режимов ЭМТ применяются характеристики двигателя в данном диапазоне, что также является преимуществом рассматриваемой ЭМТ.

Главная задача первичного двигателя КТС с ЭМТ – это создание крутящего момента на валу генераторной установки, которая, в свою очередь, является источником мощности для всех остальных агрегатов. Система «пусковой двигатель-генератор» является достаточно стабильной динамической системой, поскольку генератор обладает свойством саморегулирования, что в значительной степени влияет на снижение амплитуд крутильных колебаний двигателя. При этом расход топлива может сократиться до 20% [2] по сравнению с вариантом применения механической трансмиссии. Связь пускового двигателя и генератора может осуществляться посредством различного типа муфты, либо сцепления.

Электрическая передача «генератор – тяговый электродвигатель» имеет ряд преимуществ перед другими видами неэлектрических передач: долговечность, возможность при отдельных условиях наиболее полного использования мощности дизеля и возможность достижения широкого диапазона автоматического бесступенчатого регулирования силы тяги и скорости движения КТС при значительном облегчении труда водителя.

В результате преобразования механической энергии первичного двигателя в электрическую энергию генератора силовой поток преобразуется на валу тягового электродвигателя (ТЭД) МК в механическую энергию, передаваемую через редуктор на ступицу колеса. Управление силовым потоком осуществляется через блок управления, где силовой преобразователь выдает заданный сигнал на ТЭД. Результат преобразования отслеживается по принципу обратной связи через датчик информации (датчик положений ротора), устанавливаемый на валу ТЭД.

Генератор проектируется с учетом резерва по мощности, который используется для зарядки АКБ и работы дополнительного оборудования КТС.

3.2 Выбор оптимальных тяговых характеристик электромеханической трансмиссии

К настоящему времени подробно изучены тяговые свойства механической трансмиссии, в которой имеет место групповой дифференциальный или бездифференциальный привод колес. В работах академика Чудакова [3] подробно исследован вопрос о движении подвижного состава с вышеуказанными типами привода. Основные результаты данных исследований состоят в следующем:

1. Колеса одной оси при наличии дифференциала могут развивать (без учета потерь) только равные моменты, величина которых зависит от сцепления колеса, имеющего меньшую весовую нагрузку. По этой причине КТС с дифференциальными ведущими осями не может развивать максимальное тяговое усилие, определяемое суммой произведений весовой нагрузки на коэффициент сцепления каждого колеса.

2. Машина с осями без дифференциалов (жесткими осями) при движении по прямой на ровной поверхности развивает максимальное тяговое усилие и имеет высокую боковую устойчивость (способность противостоять заносу или началу бокового скольжения).

3. При повороте КТС с ведущей осью без дифференциала и передаче ею мощности, соответствующей максимальному тяговому усилию, внешнее колесо катится без буксования, а внутреннее буксует при условиях равной весовой нагрузки на колеса и одинаковых радиусов и коэффициентов сцепления колес. Несоблюдение одного из этих условий может вызвать буксование внешнего колеса.

4. Максимальное тяговое усилие оси без дифференциала при повороте равно максимальному тяговому усилию оси с дифференциалом при движе-

нии по прямой, если в обоих случаях соблюдаются условия, перечисленные выше.

5. Если в приводе ведущих колес нет дифференциала, то часть мощности теряется на трение между шиной и неровной поверхностью дороги и затрудняет поворот машины.

6. Трансмиссия с автоматически блокируемым во время буксования дифференциалом позволяет наилучшим образом сочетать положительные качества дифференциальных и бездифференциальных передач.

Таким образом, характер связи между ведущими колесами (дифференциальная, жесткая) существенно влияет на величину тягового усилия, от которого зависят проходимость и производительность КТС.

В трансмиссии с индивидуальными электроприводами колес отсутствуют механические связи между колесами, что позволяет выбрать рациональную схему электропривода, обеспечивающего тяговое усилие, равное сумме усилий, развиваемых колесами. Благодаря этому ЭМТ с МК объединяют положительные свойства дифференциальных и бездифференциальных трансмиссий и имеют принципиально более широкие возможности.

Для сравнения трансмиссий по признаку дифференциальности можно воспользоваться следующими условиями:

1. Дифференциальные трансмиссии (идеальные и неблокируемые):

$$n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_m; \quad M_1 = M_2 = \dots = M_m; \quad \sum F = m F_k, \quad (3.1)$$

где n_i ($i = 1, 2, \dots, m$) – скорость вращения i -го колеса;

M_i – момент на i -м колесе;

F_k – сила тяги на k -м колесе;

m – число связанных дифференциалами ведущих колес;

индексы $1, 2, \dots, m$ – порядковые номера ведущих колес;

индекс k – номер колеса с наименьшим нагрузочным моментом.

Условия (3.1) для дифференциальных трансмиссий выполняются при движении по любой поверхности и разным траекториям.

2. Бездифференциальные трансмиссии:

$$n_1 = n_2 = \dots = n_m; \quad M_1 \neq M_2 \neq \dots \neq M_m; \quad \sum F = \sum F_1 + F_2 + \dots + F_m \quad (3.2)$$

Условия (3.2) справедливы только при прямолинейном движении по ровной поверхности.

3. Ограниченно дифференциальные трансмиссии:

$$n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_m; \quad M_1 \neq M_2 \neq \dots \neq M_m; \quad \sum F = \sum F_1 + F_2 + \dots + F_m \quad (3.3)$$

Условия (3.3) выполняются для этого типа трансмиссий при движении по разным траекториям и по любой поверхности.

При сравнении этих условий очевидны преимущества трансмиссий с МК. Причем, ЭМТ, в отличие от механических трансмиссий, могут обеспечить оптимальный закон управления и являются более универсальными, чем рассмотренные три типа трансмиссий.

Один из основных элементов ЭМТ – это ТЭД. Выбор механических характеристик ТЭД является первостепенной задачей при проектировании ЭМТ. Как правило [4], в ЭМТ используются электродвигатели с достаточно мягкими характеристиками.

Мягкая характеристика (см. рис. 3.3 а) отличается значительным изменением частоты вращения вала при изменении момента. Таковы механические характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения, специальных асинхронных короткозамкнутых двигателей, асинхронных двигателей с фазным ротором и добавочным резистором, величина которого больше сопротивления в его цепи.

Абсолютно жесткой является механическая характеристика двигателя, у которого частота вращения вала остается постоянной при изменении момента. Такова механическая характеристика синхронного двигателя. Жесткая характеристика (см. рис. 3.3 б) отличается относительно небольшим (1...10%) изменением частоты вращения вала при изменении момента в рабочем диапазоне. Этими свойствами обладают механические характеристики (в их рабочей части) большинства асинхронных двигателей, двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.

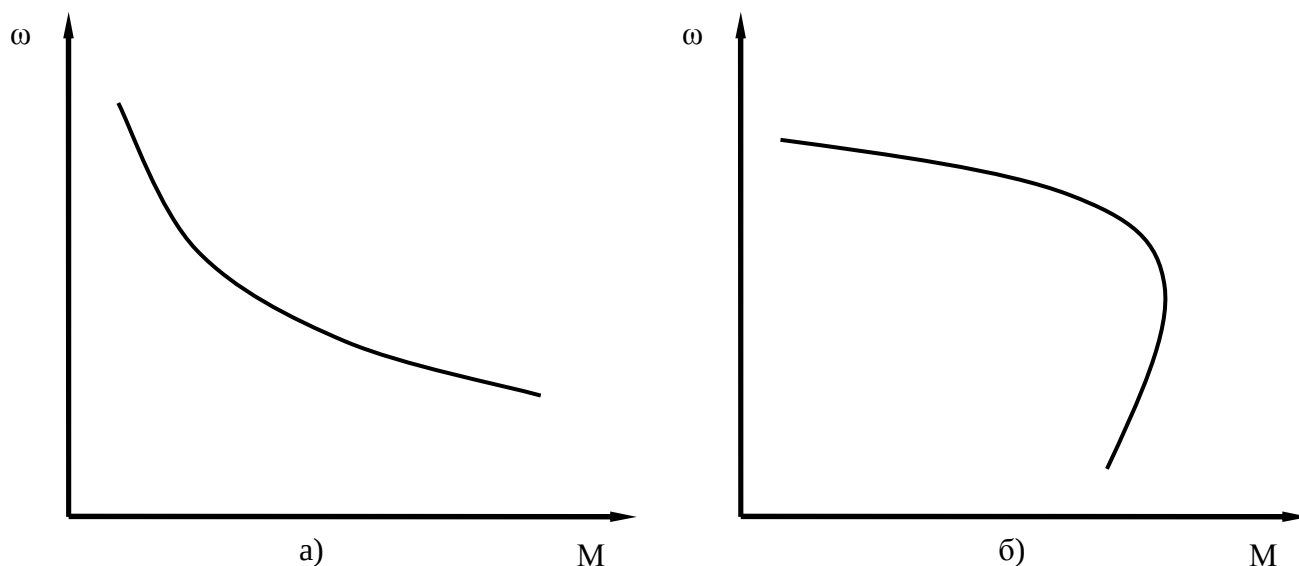


Рисунок 3.3 – Механические характеристики электродвигателей:
а) мягкая характеристика; б) жесткая характеристика

Преимущества использования электродвигателей с мягкими механическими характеристиками объясняется следующими соображениями.

1. Обычно в дорожных условиях, допускающих движение с большой скоростью, имеют место относительно небольшие сопротивления движению и малый момент двигателей. Наоборот, при тяжелых дорожных условиях, ко-

гда требуется преодолевать значительные сопротивления движению и необходим большой момент двигателей, движение осуществляется с относительно малой скоростью.

2. Характер изменения частоты вращения вала и момента приводит к относительно небольшому возрастанию нагрузки на источник электроснабжения при значительном увеличении общего сопротивления движению. Это позволяет устанавливать на КТС с автономным электроснабжением источник, например, генераторную установку, меньшей мощности, чем при использовании ТЭД с жесткой характеристикой.

Основными параметрами при определении механической характеристики ТЭД ЭМТ является мощность и момент на колесе КТС. Предельная мощность ($P_{к\text{ пред}}$) на МК определяется из условия [5]:

$$P_{к\text{ пред}} = N_e'' \beta_{всп} \eta_{тр} / n_{МК}, \quad (3.4)$$

где N_e'' – удельная мощность теплового двигателя;
 $n_{МК}$ – число МК;
 $\beta_{всп}$ – коэффициент, учитывающий затраты мощности на привод вспомогательного оборудования;
 $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии.

Предельная мощность на МК является в действительности функцией многих переменных. Это обстоятельство следует учитывать при выполнении тяговых расчетов, когда известны технические характеристики всех агрегатов электропривода. Если принять $P_{к\text{ пред}} = \text{const}$, то механическая тяговая характеристика, рассчитанная из условия реализации предельной мощности на МК, будет описана уравнением гиперболы (см.рис.3.4)

$$F_k v = \text{const}, \quad (3.5)$$

где F_k – сила тяги МК;
 v – скорость автомобиля.

Аналогичный вид имеет также характеристика

$$M_k \omega_k = \text{const}, \quad (3.6)$$

где M_k – момент на МК;
 ω_k – угловая скорость МК.

Для определения числовых значений основных параметров механической характеристики МК можно использовать, например, тяговую характеристику КТС с механической ступенчатой трансмиссией (см. рис. 3.5), которая получена как огибающая семейства тяговых характеристик на всех передачах.

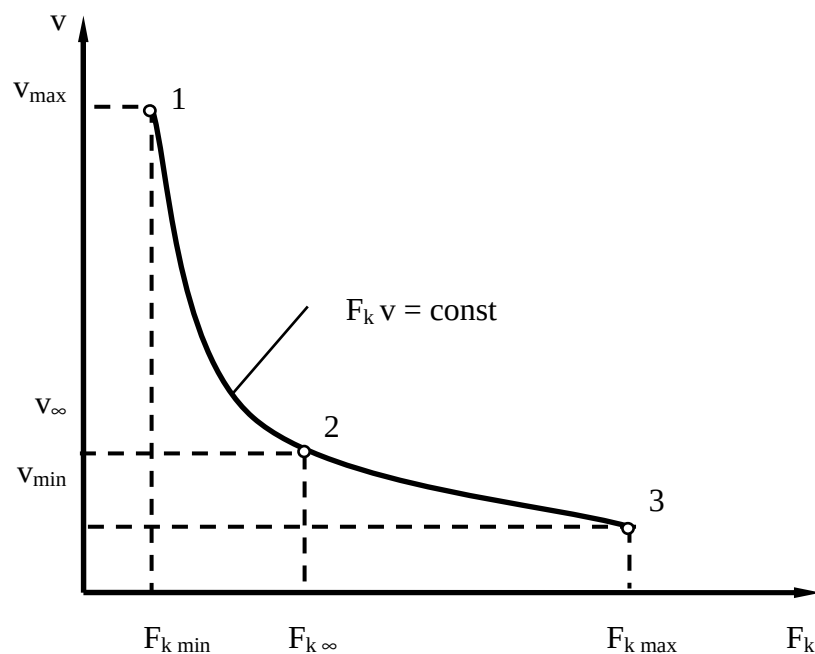


Рисунок 3.4 – Механическая характеристика МК:
 1 – режим минимальной силы тяги; 2 – длительный режим;
 3 – режим максимальной силы тяги

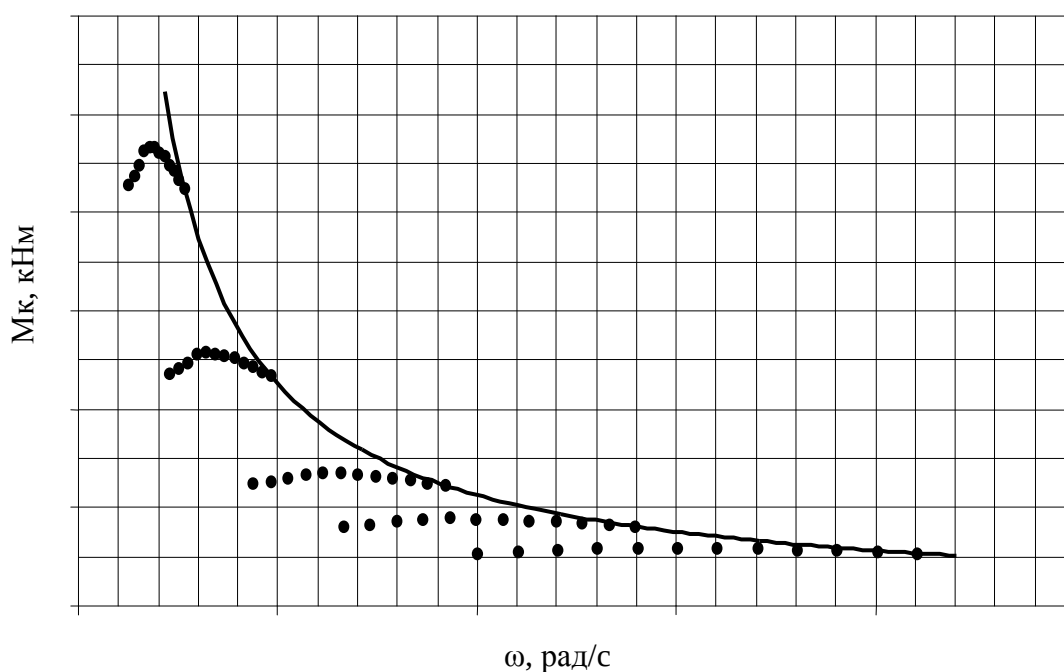


Рисунок 3.5 – Механические характеристики колеса:
 ●●● – семейство тяговых характеристик, соответствующих ступеням механических передач;
 — — предельная теоретическая тяговая характеристика, соответствующая номинальной мощности

Однако известно [6], что момент на колесе транспортного средства во многом зависит от нагрузки и коэффициентов сцепления шины с поверхностью дороги и сопротивления качению. Тогда, из условия тягово-сцепной проходимости, максимальный момент по сцеплению ($M_{\text{сц max}}$) определяется как:

$$M_{\text{сц max}} = G_k r_k \varphi_{\text{max}}, \quad (3.7)$$

где G_k – масса автомобиля, приходящаяся на колесо;
 r_k – радиус качения колеса;
 φ_{max} – максимальный коэффициент сцепления колеса с опорной поверхностью.

Сравнивая значения максимального момента $M_{k \text{ max}}$ и $M_{\text{сц max}}$ и учитывая возможности ЭМТ создавать требуемый максимальный момент на МК по условиям сцепления, для расчета механических характеристик МК принимается максимальный момент.

Поскольку КТС работает на предельных режимах достаточно ограниченное время [5], то очевидно, что не менее важной характеристикой ТЭД является момент при длительном режиме работы ($M_{\text{д}\infty}$). Данную характеристику можно определить из выражения:

$$M_{\text{д}\infty} = F_{k\infty} r_k / i_p \eta_p, \quad (3.8)$$

где $F_{k\infty}$ – сила тяги на колесе при длительном режиме работы МК;
 i_p – передаточное число редуктора МК;
 η_p – КПД редуктора МК.

Сила тяги при длительном режиме определяется как:

$$F_{k\infty} = G_k D_{\text{max}} / k_F, \quad (3.9)$$

где D_{max} – максимальный динамический фактор;
 k_F – коэффициент допустимой перегрузки ТЭД.

Другим важным параметром механической характеристики ТЭД является длительная угловая скорость вращения $\omega_{\text{д}\infty}$. Её можно определить из выражения:

$$\omega_{\text{д}\infty} = v_{\infty} i_p \eta_p / r_k, \quad (3.10)$$

где v_{∞} – длительная скорость автомобиля.

$$v_{\infty} = 3,6 k_v / D_{\max}, \quad (3.12)$$

k_v – коэффициент регулирования.

Коэффициент регулирования, или коэффициент изменения момента ТЭД, во многом зависит от изменения несущей способности грунта, то есть от изменения коэффициентов сцепления с поверхностью пути и сопротивления качению. Коэффициент сцепления может изменяться от 0,8 (сухой асфальт) до 0,2 (песок) [3], то есть в отношении 4:1. Нагрузка на колесо может изменяться в отношении 2:1, если принять среднее значение коэффициента грузоподъемности 0,5 и рассматривать КТС как снаряженной и полной массы. Таким образом, при одновременном и неблагоприятном изменении этих двух величин максимальное изменение момента может достигать отношения 8:1, если считать, что коэффициент сопротивления качению остается неизменным.

Для тяжелых КТС, например, строительно-дорожных, можно принять, что коэффициент сопротивления качению изменяется приблизительно в пределах 0,05...0,2 [3]. Тогда, при необходимости использования полной тяги по сцеплению и наибольшем сопротивлении движению, максимальные изменения момента могут достигать отношения примерно 10:1. Это необходимо учитывать при разработке конструкции ТЭД. Если же ТЭД обеспечивает меньшие пределы изменения момента, то возможно неиспользование тяги по сцеплению при максимальном моменте двигателя.

Таким образом, имея расчетные параметры механической характеристики ТЭД, можно определить режимы работы ЭМТ во всем диапазоне нагрузок и реализовать оптимальную тяговую характеристику МК, а соответственно, и ЭМТ.

3.3 Особенности проектирования мотор-колес

Основной особенностью проектирования ЭМТ с МК является рациональное размещение и компоновка её отдельных агрегатов. В частности, рассмотрим особенности проектирования МК, так как оно является наиболее значимым комплексным агрегатом во всей ЭМТ.

Характерная особенность МК - его весьма рациональная компоновка, при которой электродвигатель полностью или частично размещен внутри обода непосредственно у колеса, а также сведены к минимуму число и размеры деталей механической передачи.

МК представляет собой отдельный комплекс, конструктивно объединяющий в ограниченном монтажном объёме следующие элементы исполнительного механизма:

- тяговый электродвигатель;
- механическую передачу, состоящую из редуктора, механизма соединения вала электродвигателя с ведущим звеном редуктора;

- колесо, состоящее из шины обода и ступицы;
- опорные подшипники колеса;
- механический тормоз, осуществляющий торможение МК, с соответствующим приводом;
- элементы уплотнения полостей редуктора, подшипников колеса, а также полости МК;
- элементы механизма подвески МК к раме транспортного средства;
- элементы системы поворота (для управляемых колес).

Рассмотрим особенности компоновки МК. Основная задача, возникающая при компоновке, заключается в размещении всех необходимых элементов МК в ограниченном посадочным диаметром шины монтажном объеме с обеспечением доступа к тем элементам, которые требуют осмотра и обслуживания в процессе эксплуатации. Компоновка МК оказывает большое влияние на его конструктивные и эксплуатационные свойства. На этапе размещения электродвигателя необходимо учитывать, что электродвигатель является наиболее крупногабаритным элементом МК (кроме шины).

Тепловой режим электродвигателей зависит от расхода охлаждающего воздуха. Компоновка МК должна предусматривать удобный подвод и отвод охлаждающего воздуха, а также создание в полости МК воздухопровода с возможным минимальным аэродинамическим сопротивлением. Для выполнения этого условия следует избегать таких компоновочных решений, которые предусматривают поворот потока охлаждающего воздуха в полости МК на большой угол (более 90°).

Важную роль при компоновке МК играет выбор опоры для подшипников колеса. В качестве неподвижной (относительно рамы автомобиля) опоры внутренних обойм подшипников колеса можно использовать корпус электродвигателя или монтажный цилиндр, внутри которого размещен электродвигатель, корпус редуктора или специальную опорную деталь, располагаемую обычно между электродвигателем и редуктором.

Весьма рациональна установка опорных подшипников 1 (см. рис.3.6 а) колеса на корпусе электродвигателя 2, который имеет относительно большую длину, что позволяет разнести опорные подшипники на достаточно большое расстояние, необходимое по условию обеспечения устойчивости колеса. При специальном изготовлении электродвигателя для конкретного МК размеры корпуса электродвигателя могут быть согласованы с размерами подшипников. Этот способ установки подшипников не связан с увеличением осевого размера МК.

Однако при установке подшипников на корпусе электродвигателя приходится использовать подшипники значительного размера (с внутренним диаметром не меньше диаметра корпуса), большой массы и обычно с запасом по коэффициенту работоспособности.

При расположении подшипников колеса на корпусе редуктора 3 (см. рис. 3.6 б), как и в случае их установки на корпусе электродвигателя, не требуется увеличения осевого размера МК, однако возникают серьезные трудности с разнесением подшипников вследствие небольшой длины корпуса ре-

дуктора. Кроме того, диаметральный размер редуктора не всегда допускает установку подшипников на его корпусе. Необходимо также соответствующее усиление корпуса, что приводит к увеличению массы МК.

При установке опорных подшипников на специальной детали 4 (см. рис. 3.6 в) удастся использовать подшипники уменьшенного размера с необходимым коэффициентом работоспособности. Однако размер опорной детали по оси МК в случае установки на ней обоих подшипников и необходимости их разнесения на достаточное расстояние получается относительно большим, что

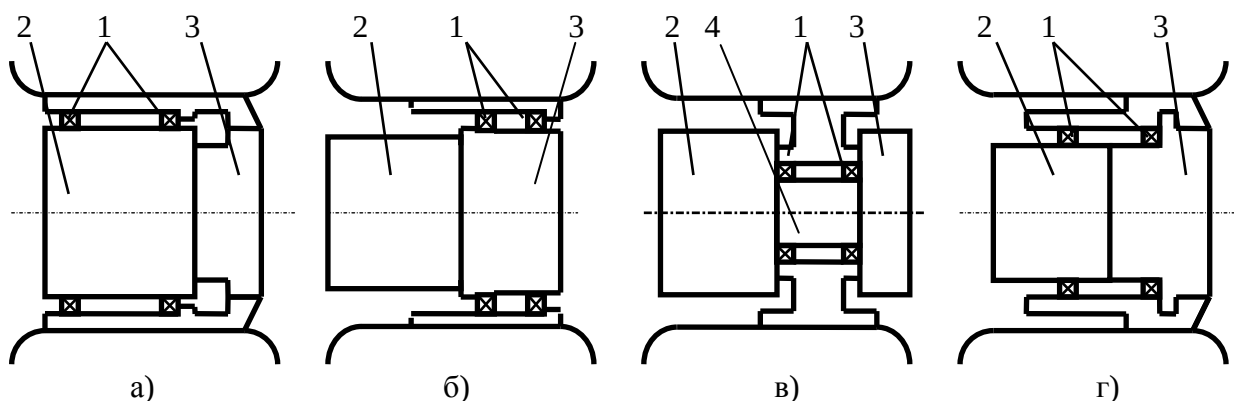


Рисунок 3.6 – Схемы установки опорных подшипников колеса:

- а – установка опорных подшипников на корпусе электродвигателя;
- б – установка опорных подшипников на корпусе редуктора;
- в – установка опорных подшипников на специальной детали;
- г – комбинированная установка опорных подшипников.
- 1 – опорные подшипники; 2 – корпус электродвигателя;
- 3 – корпус редуктора; 4 – дополнительная деталь

приводит к заметному увеличению осевого размера МК.

Известны компоновки МК с использованием подшипников одинакового или различного размеров, где в качестве их опоры использованы различные детали (см. рис. 3.6 г). В этом случае удастся получить вполне удовлетворительные компоновочные решения, однако использование подшипников различного размера нежелательно.

При выборе опоры подшипников колеса следует принимать во внимание монтажные свойства МК. Демонтаж опорных подшипников - операция трудоемкая и обычно требует демонтажа МК. Поэтому в качестве опоры подшипников колеса не следует использовать деталь МК, демонтаж которой может потребоваться в эксплуатации.

Наименее надежными и требующими определенного внимания в эксплуатации элементами МК являются уплотнения. Их назначение - препятствовать утечке масла из корпуса редуктора и из полости опорных подшипников в стыке поверхностей двух вращающихся одна относительно другой деталей и попаданию влаги на обмотки электродвигателя МК. Число уплотнений в выполненных образцах МК обычно составляет от двух до четырех (см. рис. 3.7), в зависимости от его выбранной компоновки. Одно из серьезных требований к компоновке МК заключается в уменьшении числа уплотнений.

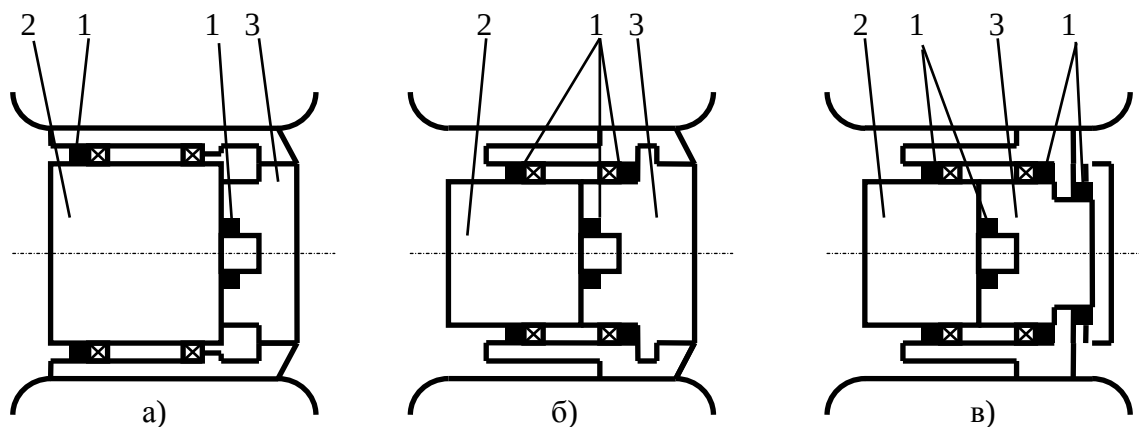


Рисунок 3.7 – Схемы установки уплотнений МК:
а – при двух уплотнениях; б – при трех уплотнениях; в – при четырех уплотнениях.
1 – уплотнение; 2 – корпус электродвигателя; 3 – корпус редуктора

Большое значение имеет выбор места установки уплотнения, с чем связан и его размер. Увеличение размеров уплотнения не означает снижения его надежности. При определенных условиях сальниковые уплотнения большого размера могут быть не менее надежными, чем уплотнения сравнительно небольших размеров. Однако изготовление уплотнений больших размеров встречает известные технологические трудности и не всегда удастся обеспечить их высокое качество и выдержать проектные допуски по посадочным поверхностям уплотнений.

Хотя при разгоне, торможении и стоянке КТС с ЭМТ его торможение осуществляется с помощью МК, для повышения безопасности необходим дополнительный стояночный тормоз. Серьезной проблемой является, например, размещение дополнительного механического тормоза. В МК принципиально возможно связать механический тормоз (см. рис. 3.8) с одним из следующих элементов кинематической схемы:

- с валом электродвигателя или с деталью, непосредственно связанной с валом;
- с промежуточными звеньями редуктора;
- с выходным звеном редуктора, жестко связанным с колесом.

Связь механического тормоза с валом электродвигателя (см. рис. 3.8 а) позволяет предельно сократить размеры деталей тормоза и выполнить его как узел, монтируемый на корпусе электродвигателя. Существенно упрощается привод тормоза благодаря небольшим тормозным моментам. Компоновка МК при использовании тормоза, связанного с валом электродвигателя, получается более простой, чем при использовании колесного тормоза. Тем не менее, широкого применения механические тормоза, связанные с валом электродвигателя, не получили. Причины заключаются в пониженной эксплуатационной надежности и в необходимости передавать тормозные моменты через механическую передачу МК. Следует также обеспечить свободный доступ для осмотра и обслуживания деталей тормоза, поскольку в тормозах этого типа наблюдается интенсивный износ фрикционных элементов.

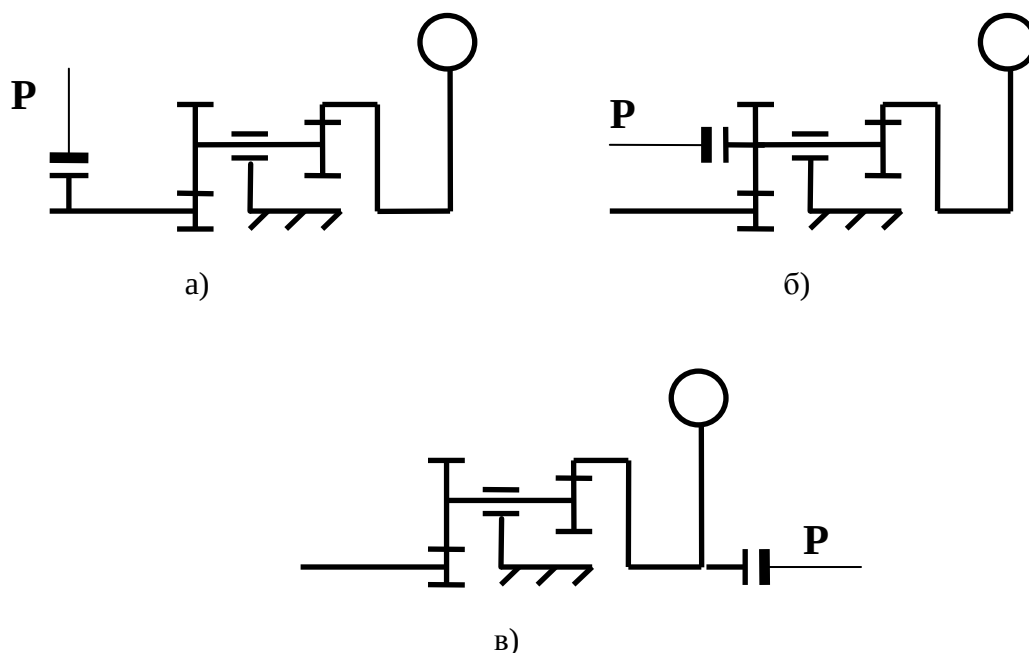


Рисунок 3.8 – Кинематические схемы МК с различными вариантами установки механического тормоза:

а – на валу электродвигателя; б – на промежуточном звене редуктора; в – на колесе

Связь механического тормоза с промежуточными звеньями редуктора (см. рис. 3.8 б) встречает трудности компоновочного и конструктивного характера, вследствие чего это решение реализуют крайне редко. Положительным свойством данного варианта является уменьшение размеров деталей тормоза и повышение эксплуатационной надежности по сравнению с вариантом, приведенным на рисунке 3.8 а.

Связь механического тормоза с выходным звеном редуктора обеспечивает передачу тормозной силы непосредственно на колесо, что и определяет надежность механического тормоза в указанном исполнении (см. рис. 3.8 в). Однако тормозной момент при этом возрастает в i_p (i_p – передаточное число редуктора) раз по сравнению с моментом тормоза, связанного с валом электродвигателя. Соответственно возрастают и размеры деталей тормоза и его привода.

Для МК по своему конструктивному исполнению более всего подходят одно- или многодисковые колесные тормоза, облегчающие общую компоновку агрегата. Колодочный тормоз более практичен, но занимает достаточно большой монтажный объем, что не рационально.

При компоновке МК следует тщательно оценить возможность выполнения его конструктивными элементами различных функций. Эта мера, характерная для МК как агрегата, выполненного в ограниченном монтажном объеме, является весьма целесообразной, поскольку позволяет улучшить компоновку и конструкцию МК, а также уменьшить его массу.

Корпус электродвигателя, например, выполняет функции участка магнитопровода (при постоянном токе), но может служить и установочной дета-

лью для монтажа подшипниковых щитов. Использование корпуса электродвигателя в качестве опоры подшипников колеса, т. е. в качестве оси колеса, является для корпуса новой функцией. Кроме того, корпус электродвигателя часто используют для установки на нем деталей тормоза и элементов подвески. Во втором случае сравнительно большой диаметр корпуса электродвигателя рассматривают как положительный фактор, поскольку это обеспечивает достаточно прочную опору колеса даже в том случае, когда крепление МК выполнено со стороны внутреннего торца корпуса, что создает сравнительно большую консоль между плоскостью крепления и плоскостью ближайшего опорного подшипника колеса. Отметим также возможность исполнения электродвигателя и редуктора в одном корпусе.

Один из подшипниковых щитов может выполнять функции внутренней стенки корпуса редуктора, на нем крепят оси двух венечных шестерен при использовании передач с неподвижными осями звеньев и устанавливают сальниковое уплотнение, препятствующее попаданию жидкой смазки редуктора в полость электродвигателя.

При использовании в редукторе планетарных передач функции цилиндрической стенки редуктора может выполнять коронная шестерня. При установке редуктора с внешней стороны МК функции наружной стенки редуктора может выполнять его выходное звено, а именно - водило.

Подшипниковые щиты электродвигателя и стенки корпуса редуктора иногда выполняют так, чтобы они создавали участки воздуховода. Это очень существенно для получения рационального компоновочного решения, поскольку создание воздуховода с приемлемой аэродинамической характеристикой является одной из важных задач при компоновке МК.

На стадии выбора компоновки МК также решают вопрос о размещении электрических проводов для питания обмоток электродвигателя. Эта задача при кажущейся элементарности часто накладывает существенные ограничения на выбор компоновки агрегата и предъявляет специфические требования к месту электрических выводов на корпусе или подшипниковых щитах электродвигателя и к конструкции вводов.

Последнее из рассматриваемых требований к компоновке МК заключается в определении способа крепления агрегата к раме автомобиля при помощи элементов системы подвески выбранного типа. Монтаж элементов подвески выполняют непосредственно на детали, служащей опорой подшипников колеса, или на детали, жестко связанной с опорой подшипников.

С учетом проведенного анализа была проведена компоновка МК с вентильным электродвигателем торцевого типа с постоянными магнитами.

Глава 4 Компонувочные решения и типовой расчет привода

Конструирование МК представляет собой важный этап проектирования ЭМТ. На начальном этапе проектирования МК определяются целевая функция и частные критерии оптимальности конструкции его элементов, основные параметры и вид компоновки. Все элементы конструкции МК, за исключением элементов крепления подвески, должны быть унифицированы и вписаны в обод колеса. На стадии эскизного проекта МК следует принять принципиальное решение о конструкции системы подвески и об элементах МК, которые будут использованы для крепления деталей подвески.

Наиболее крупногабаритной частью МК является ТЭД, который для автомобилей класса «Урал» может быть спроектирован на базе вентильного двигателя (ВД) с позиционной коммутацией. Коллекторно-щеточный узел данного ТЭД заменен бесконтактным полупроводниковым коммутатором, управляемым датчиком положения ротора. При замене механического коммутатора (коллектора со щетками) полупроводниковым коммутатором (инвертором), двигатель становится более надежным и долговечным, создает меньше радиопомех, может применяться для работы в агрессивных и взрывоопасных средах, его габариты на 20-30% меньше габаритов асинхронных и коллекторных электродвигателей.

Особые преимущества ВД достигнуты за счет специальной конструкции торцевого типа и применения магнитов из сплава NdFeB. Индуктор (ротор) такого ТЭД представляет собой тонкостенный диск с расположенными по периметру магнитами. Это позволяет существенно снизить габаритные размеры электродвигателя.

Компоновка МК оказывает большое влияние на его конструктивные и эксплуатационные свойства, в частности на его осевой размер и массу. Поиск рациональной компоновки является тем этапом проектирования МК, на котором принимают принципиальные решения, вводящие последующий процесс конструирования агрегата в определенные и достаточно узкие границы с точки зрения выбора тех или иных частных конструктивных решений. Конструктивная проработка отдельных узлов лишь развивает принятое компоновочное решение [5]. Также в процессе разработки возникают вопросы оптимизации МК.

Анализ различных компоновочных вариантов с учетом оптимальных весовых показателей отдельных узлов МК показал, что наиболее приемлемым вариантом является пропорциональное соотношение масс ТЭД и редуктора. Это дает возможность минимизировать массу МК в целом. Другой фактор оптимизации – передаточное число редуктора, от которого зависит задаваемая величина момента электродвигателя. В планетарном редукторе рациональная величина передаточного числа $i_p = 3...4$ для одного ряда.

4.1 Компоновка мотор-колеса с однорядным редуктором

На рисунке 4.1 изображен вариант компоновки МК, в которой применен редуктор с малым передаточным числом $i_p = 3,8$, что требует более мощного ТЭД и, соответственно, увеличения габаритов ТЭД в осевом направлении.

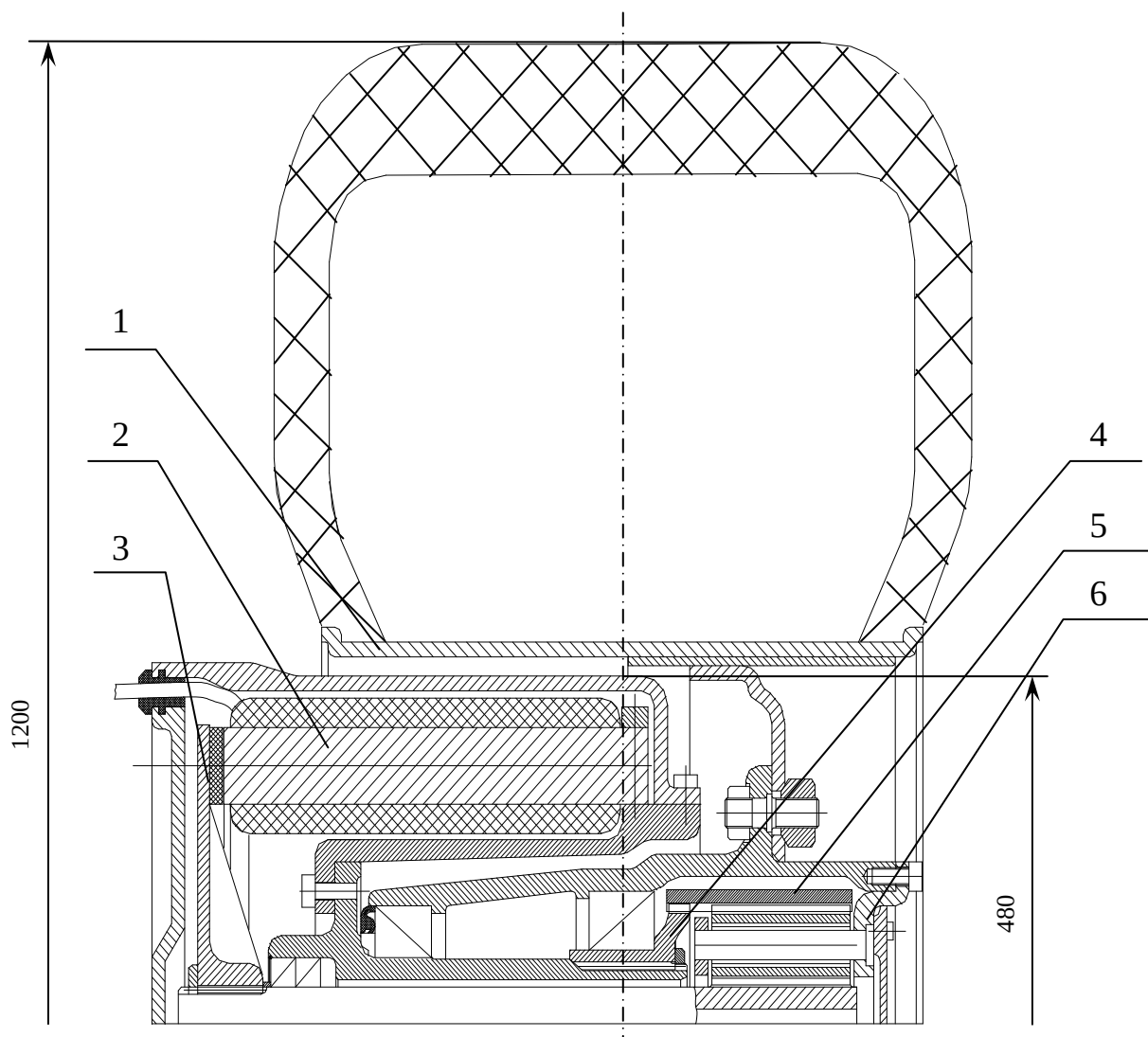


Рисунок 4.1 – Мотор-колесо с однорядным редуктором:
1 – колесо; 2 – статор ТЭД; 3 – ротор ТЭД; 4 – зубчатая муфта;
5 – корончатая шестерня редуктора; 6 – водило редуктора.

Из рисунка 4.1 видно, что от ротора электродвигателя 2, жестко закрепленного на валу МК, момент передается к планетарному редуктору. Корончатая шестерня редуктора 5 заторможена через зубчатую муфту 4, что дает ей возможность самоустанавливаться в процессе работы, что, в свою очередь, ведет к пониженному износу и меньшей шумности передачи. Поскольку корончатая шестерня заторможена, то вращающий момент редуктора передается через водило 6, которое жестко соединено со ступицей колеса.

Данный вариант МК имеет высокую плотность компоновки и сравнительно простую конструкцию. Однако, из-за высокого момента ТЭД, данный вариант имеет большую массу. В таблице 4.1 приведено распределение масс по звеньям МК с однорядным редуктором без учета массы колес и шин.

Таблица 4.1 – распределение массы по элементам МКс однорядным редуктором

Наименование элементов МК	Масса, %
Электродвигатель	
Ротор	4,45
Статор	30,55
Корпус статора	4,2
Редуктор	
Зубчатые колеса	4,7
Водило	7,8
Оси сателлитов, подшипники	1,1
Корпусные детали	
Корпус опорных подшипников	17,5
Внешний корпус	13,3
Крышка корпуса	4,45
Цапфа	7,5
Прочие детали	
Крепежные детали, элементы герметизации	4,45
Итого:	100

4.2 Компоновка мотор-колеса с двухрядным редуктором

Для снижения габаритов и веса электродвигателя необходимо увеличить передаточное число редуктора, что реализуется за счет применения двухрядного редуктора (см. рис. 4.2) при увеличении его межцентрового расстояния и, соответственно, массы. Схема, представленная на рисунке 4.2 а, наиболее оптимальна в осевом размере, чем схема, представленная на рисунке 4.2 б. Но при этом значительное преимущество второй схемы в том, что межцентровое расстояние первого ряда не зависит от межцентрового расстояния второго ряда. Это дает возможность более широко варьировать передаточными числами рядов при конструировании редуктора.

Учитывая вышеизложенные доводы, предпочтительнее применить схему 4.2 б. Данный вариант наиболее оптимален с точки зрения габаритно-массовых показателей, по отношению к однорядному редуктору. Схема компоновки МК с двухрядным редуктором представлена на рисунке 4.3. Из рисунка 4.3 видно, что в отличие от рисунка 4.1 увеличилось межосевое расстояние редуктора, что в значительной мере влияет на уменьшение осевого размера редуктора. Увеличение передаточного отношения позволяет уменьшить осевой размер ТЭД, следовательно, уменьшить массу. Также уменьшается масса корпусных деталей. Однако усложняется технология изготовления в связи с добавлением второго ряда редуктора. Следует отметить, что при равных тяговых характеристиках масса МК с однорядным редуктором на 20...25% больше массы МК с двухрядным редуктором (без учета массы колес и шин).

В таблице 4.2 приведено распределение масс элементов МК с двухрядным редуктором без учета массы колес и шин.

Таблица 4.2 – распределение массы по элементам МКс двухрядным редуктором

Наименование элементов МК	Масса, %
Электродвигатель	
Ротор	3,7
Статор	31,5
Корпус статора	4,2
Редуктор	
Зубчатые колеса	20,0
Водило	7,0
Оси сателлитов, подшипники	2,6
Корпусные детали	
Корпус опорных подшипников	5,9
Внешний корпус	9,3
Крышка корпуса	5,55
Цапфа	10,75
Прочие детали	
Крепежные детали, элементы герметизации	3,7
Итого:	100

4.3 Компоновка мотор-редуктора с расположением элементов привода в балке моста

Данный вариант компоновки предполагает размещение элементов электропривода колес в балке моста (см. рис. 4.4). Такая схема привода близка по конструкции к мотор-колёсам и носит название электромотор-ось (далее мотор-ось). Она представляет собой балку моста с мотор-редуктором, крутящий момент от которого через полуоси передаётся на ведущие колёса. Мотор-редуктор, в свою очередь, является механизмом, преобразующим электрическую энергию в механическую. Мотор-оси с управляемыми ведущими колёсами аналогичны по конструкции за исключением того, что на них установлены поворотные кулаки и крутящий момент передаётся на колёса через полуоси и шарниры равных угловых скоростей.

В целом применение мотор-осей не лишает конструкцию основных преимуществ мотор-колёс. По сравнению с мотор-колёсной схемой, применение мотор-осей позволяет несколько упростить и удешевить установку на базовый автомобиль электромеханической трансмиссии. Так как изменения, вносимые в конструкции таких систем как подвеска, рулевое управление и частично тормозная система (рабочая и запасная тормозная система) минимальны или отсутствуют совсем. Тем самым достигается высокая степень унификации элементов конструкции с базовой моделью транспортного средства.

В таблице 4.3 приведено распределение масс электромеханического привода для одной полуоси.

Таблица 4.3 – распределение массы по элементам электропривода для одной полуоси

Наименование элементов МК	Масса, %
Электродвигатель	
Ротор	10,3
Статор	33,3
Корпус статора	7,4
Редуктор	
Зубчатые колеса	13,9
Валы, подшипники	4,3
Корпусные детали	
Корпус опорных подшипников	6
Внешний корпус	21,8
Прочие детали	
Крепежные детали, элементы герметизации	3
Итого:	100

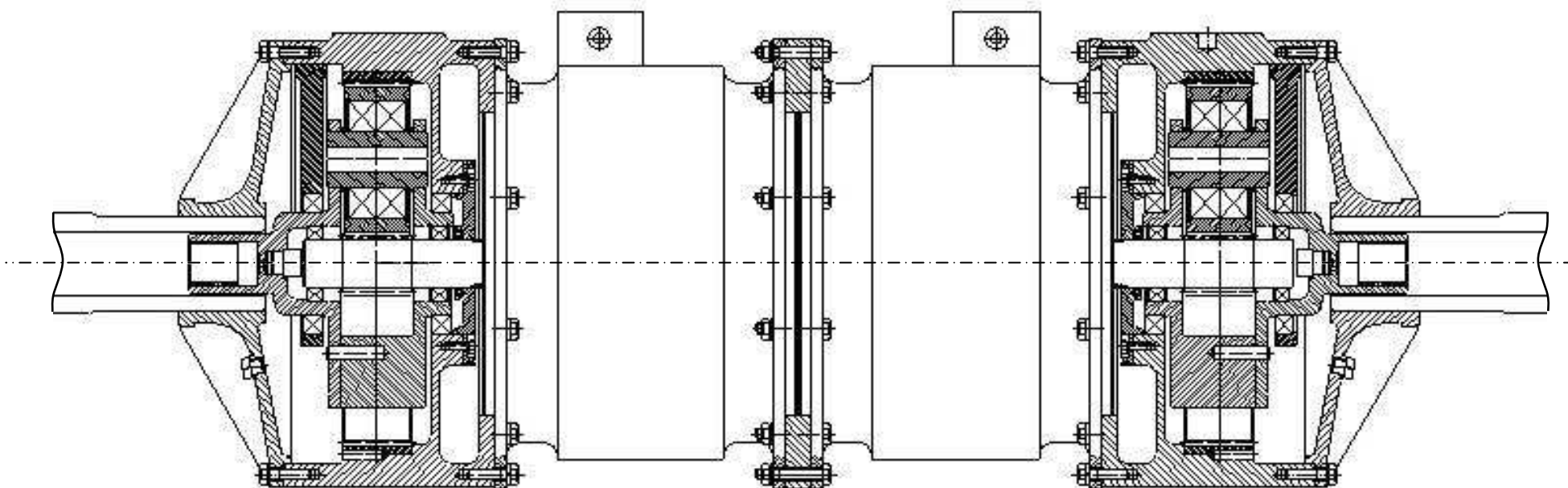


Рисунок 4.4 – Электропривод с размещением элементов в балке моста

4.4 Пример расчета планетарного редуктора двухрядной компоновки

Редуктор, применяемый в конструкции двухрядного варианта компоновки МК, состоит из двух однотипных планетарных рядов. Схема планетарного ряда представлена на рисунке 4.5. Данная схема является наиболее распространенной. КПД данной передачи $\eta = 0,99 \dots 0,97$ [3]. Поскольку редуктор состоит из двух планетарных рядов, то очевидно, что суммарный КПД редуктора составит $\eta_p = 0,98 \dots 0,94$.

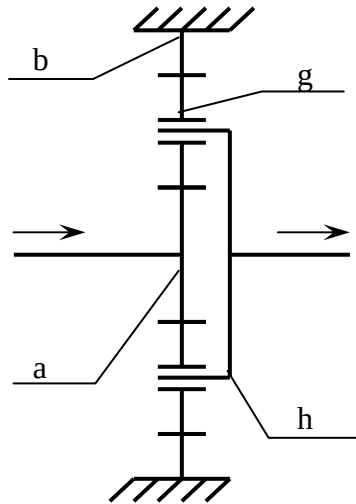


Рисунок 4.5 – Схема планетарного ряда:

a – солнечная шестерня; b – корончатая шестерня; g – сателлит; h – водило

4.4.1 Определение основных геометрических параметров

Поскольку редуктор должен быть вписан в обод колеса, то в радиальном направлении его размер ограничен двумя диаметрами, а именно: внутренним диаметром обода колеса ($D_{\max}$) и наружным диаметром цапфы ($D_{\min}$).

В данном разделе приведен пример расчета редуктора для МК, размещаемого в колесе 400Г-508. $D_{\max} = 420$ мм; $D_{\min} = 120$ мм. Учитывая условия сборки и оптимальные значения передаточного отношения, получены следующие величины основных геометрических параметров редуктора, приведенные в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Ряд	Z_a	Z_b	Z_g	m , мм	a_w , мм	i	n_c
1	66	134	34	3,0	150	3,03	4
2	84	116	16	3,5	175	2,38	4

В таблице 4.4 обозначено:

Z – количество зубьев соответствующей шестерни;

m – модуль зацепления;

a_w – межцентровое расстояние;

i – передаточное отношение соответствующего ряда;
 n_c – количество сателлитов соответствующего ряда.

4.4.2 Определение угловых скоростей звеньев редуктора

Угловые скорости звеньев редуктора определялись из расчета максимальной скорости автомобиля $v_{k \max} = 90$ км/ч и суммарного передаточного отношения редуктора $i_p = 7,21$.

Угловая скорость на солнечной шестерне первого ряда определялась по формуле

$$\omega_{a1} = \omega_{h2} i_p, \quad (4.1)$$

где ω_{h2} – угловая скорость водила второго ряда;

$$\omega_{h2} = v_{k \max} r_k. \quad (4.2)$$

Угловая скорость водила первого ряда и, соответственно, угловая скорость солнечной шестерни второго ряда определялась по формуле:

$$\omega_{h1} = \omega_{a2} = \omega_{h2} i_2. \quad (4.3)$$

Угловые скорости сателлитов относительно соответствующего водила определялись по формуле

$$\omega_g - \omega_h = \omega_h 2p/(1-p), \quad (4.4)$$

где $p = Z_b / Z_a$.

Значения угловых скоростей звеньев редуктора приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Ряд	$\omega_a, 1/c$	$\omega_b, 1/c$	$\omega_h, 1/c$	$\omega_g - \omega_h, 1/c$	p
1	329,85	0	108,86	-429,10	1,38
2	108,86	0	45,74	-332,22	2,03

4.4.3 Определение зависимостей, связывающих моменты и мощности звеньев редуктора, без учета потерь на трение

Моменты и мощности, передаваемые основными звеньями редуктора, связаны зависимостями

$$\left. \begin{aligned} M_a + M_b + M_h &= 0 \\ M_a n_a + M_b n_b + M_h n_h &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

где n – угловая скорость (об/мин) соответствующего звена;

$$n = 30\omega/\pi. \quad (4.6)$$

Для определения расчетных моментов и скоростей необходимо определить их максимальные значения. Моменты на солнечной и корончатой шестерне соответствующего ряда определяются по формулам:

$$M_a = -M_h / (p+1); \quad (4.7)$$

$$M_b = -M_h p / (p+1). \quad (4.8)$$

Значения моментов и скоростей, передаваемых звеньями редуктора, приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6

Ряд	M_a , Н	M_b , Н	M_h , Н	n_a , об/мин	n_b , об/мин	n_h , об/мин
1	2052,3	4166,2	6218,5	3150,0	0	1039,6
2	-6218,5	-8581,5	14800,0	1039,6	0	436,8

4.4.4 Определение сил в зацеплении

Максимальная сила на солнечной шестерне первого ряда, возникающая от действия максимального момента электродвигателя, определяется по формуле

$$P_{a \max} = 2 M_{a \text{ расч}} \Omega / n_c d_{a1}, \quad (4.9)$$

где $M_{a \text{ расч}}$ – расчетный момент;

$$M_{a \text{ расч}} = M_{k \max} / i_p \eta_p, \quad (4.10)$$

Ω – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по сателлитам, $\Omega = 1,1$;

d_{a1} – диаметр начальной окружности солнечной шестерни первого ряда;

$$d_{a1} = Z_{a1} m_1. \quad (4.11)$$

Сила P_b , действующая на зубья корончатой шестерни, равна силе P_a (см. рис.4.6), при этом результирующая сила $P_h = -2P_a$ при следующем условии

$$x_a + x_g = x_b - x_g, \quad (4.12)$$

где x – коэффициент смещения соответствующей шестерни.

Значения сил в зацеплении соответствующего ряда приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

Ряд	P_a , кН	P_b , кН
1	11,75	-23,5
2	-12,0	24,0

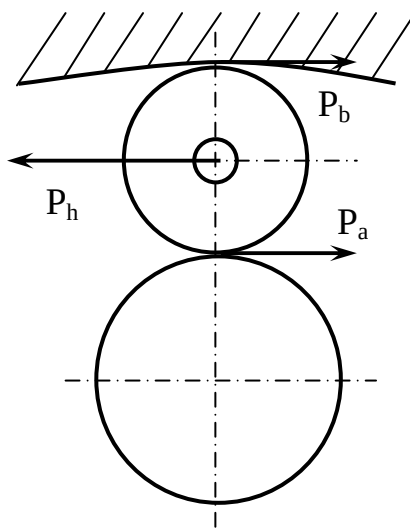


Рисунок 4.6 – Схема распределения сил в зацеплении

Удельная расчетная окружная сила W , отнесенная к единице рабочей ширины венца b_w , определяется по формуле

$$W = P_a K / b_w, \quad (4.13)$$

где K – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки между зубьями и по ширине зацепления, $K = 1,5$.

Рабочая ширина венца определяется из условий расчета на контактную и изгибную прочность.

4.4.5 Расчет ширины венца на контактную прочность

Расчет проводится для внешнего зацепления при условии действия максимального момента. Контактные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_H = 332 (p+1) \sqrt{w/(a_w p)}. \quad (4.14)$$

Допускаемое контактное напряжение определялось по формуле

$$\sigma_{HP} = 23 \text{ HRC}_9, \quad (4.15)$$

где HRC_9 – твердость по Роквеллу (для цементируемых легированных сталей $\text{HRC}_9 = 61 \dots 63$).

Из условия $\sigma_H \leq \sigma_{HP}$ получено, что $b_{\omega 1} \geq 28 \text{ мм}$, $b_{\omega 2} \geq 23 \text{ мм}$.

4.4.6 Расчет ширины венца из условий на изгибную прочность

Напряжения изгиба определялись по формуле

$$\sigma_F = Y_F w / m, \quad (4.16)$$

где Y_F – коэффициент ширины зуба, $Y_F = 3,7$.

Допускаемые напряжения изгиба составляют 400...500 МПа для цементируемых легированных сталей [6]. Из условия $\sigma_F \leq \sigma_{FP}$ получено, что $b_{\omega 1} \geq 44 \text{ мм}$, $b_{\omega 2} \geq 39 \text{ мм}$. Таким образом, значение ширины венца принимается из условия изгибной прочности.

4.5 Пример расчет стояночного тормоза

Рабочий орган тормоза представляет собой многодисковый «мокрый» фрикцион. Подвижные диски установлены на шлицах, выполненных на ободе водила планетарного редуктора МК, неподвижные – на шлицах крышки корпуса МК.

Привод тормоза гидравлический, выполненный по замкнутой схеме. Исполнительными органами гидравлической схемы являются сильфоны. В каждом МК установлены по три нажимных сильфона 1 (см. рис. 4.7). Рабочее давление в гидравлической системе создается сильфоном 2, сжатие которого осуществляется электродвигателем 4 через винтовую пару 3. В аварийных ситуациях, например, при нарушении питания ТЭД торможение осуществляется при помощи рукоятки 5 установленной на валу электро-двигателя 4 через муфту 6. Исходные данные приведены в таблице 4.8.

Момент трения тормоза МК определялся по формуле

$$M_{тр} = \pi D^2 \cdot \rho \cdot R \cdot f \cdot n \cdot N / 4. \quad (4.17)$$

Суммарный момент трения 4-х МК составляет $M_{тр\Sigma} = 25870 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Таблица 4.8

Наименование	Обозначение	Числовое выражение
Количество сильфонов одного тормоза	n	3
Количество пар трения	N	12
Средний радиус дисков	R, м	0,18
Диаметр нажимного сильфона поз.4	D, см	6
Диаметр сильфона поз.3	D, см	4
Давление в гидросистеме в конце хода	P, кг/см ²	30
Ход сильфона поз.1	X ₁ , мм	5
Винтовая пара прихода:		
Средний диаметр	d _{ср} , мм	12
Шаг резьбы	t, мм	4
Коэффициент трения (сталь по стали со смазкой)	f	0,12

Момент электродвигателя в конце хода привода определялся по формуле

$$M_{\text{э.дв.}} = \pi D^2 \cdot \rho \cdot \text{tg}(\alpha + \beta) \cdot d_{\text{ср}} / 4 \quad (4.18)$$

где α – угол подъема винтовой линии, $\alpha = 6^\circ$;
 β – угол трения, $\beta = 7^\circ$;

$$\alpha = \text{arctg}(t / \pi d_{\text{ср}}), \quad (4.19)$$

$$\beta = \text{arctg} f. \quad (4.20)$$

Момент электродвигателя $M_{\text{э.дв.}} = 10,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Ход сильфона (позиция 2, рис. 4.7) определялся по формуле

$$X_2 = 4X_1 \cdot (D^2 / d^2) \cdot 2n, \quad (4.21)$$

$$X_2 = 67,5 \text{ мм}.$$

Число оборотов ротора электродвигателя (и рукоятки привода) за один цикл торможения:

$$n_{\text{эл.дв.}} = X_2 / t, \quad (4.22)$$

Число полных оборотов $n_{\text{эл.дв.}} = 17$.

Усилие на рукоятке 5 в конце цикла торможения определялся по формуле

$$P_p = M_{\text{э.дв.}} / R_p, \quad (4.23)$$

где R_p – плечо рычага рукоятки.

Тогда при $R_p = 120 \text{ мм}$; $P_p = 14,5 \text{ кг/см}^2$.

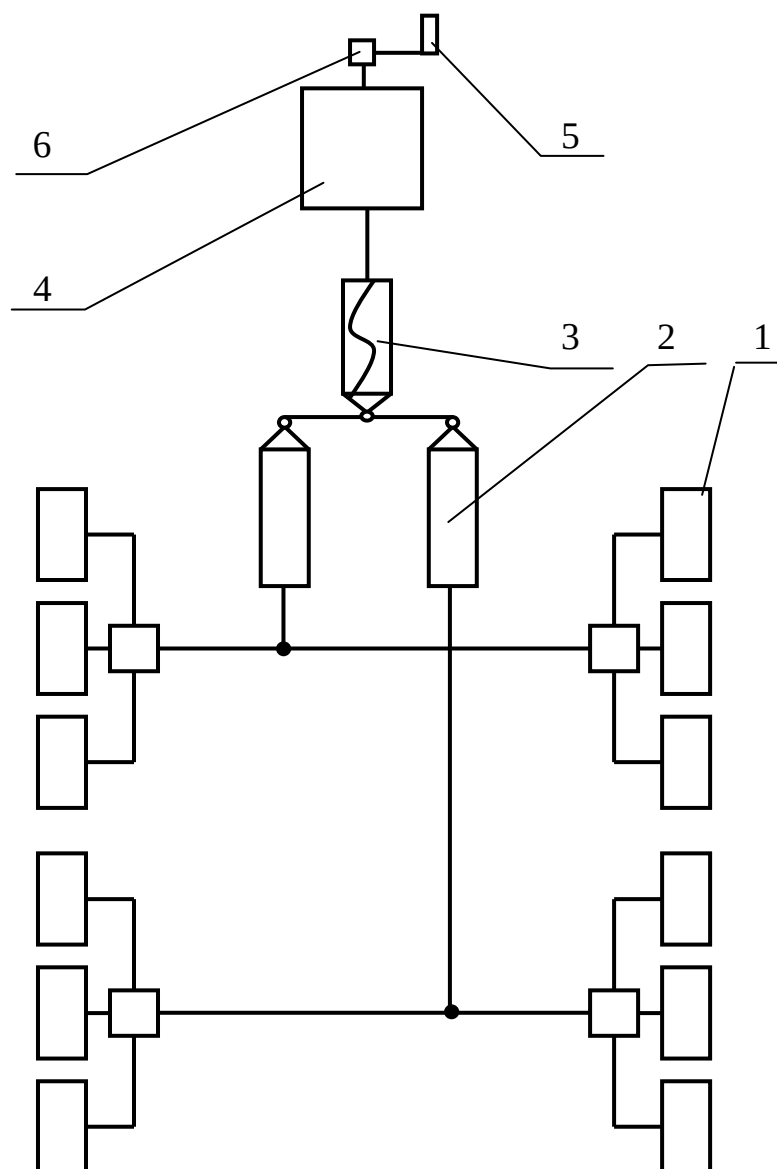


Рисунок 4.7 – Схема стояночного тормоза:
 1 – сильфон МК; 2 – сильфон механизма привода тормоза; 3 – винтовая пара;
 4 – электродвигатель; 5 – рукоятка ручного привода; 6 – муфта выключения рукоятки

Библиографический список

1. И.С. Ефремов, А.П. Пролыгин, Ю.М. Андреев, А.Б. Миндалин. Электрические трансмиссии пневмоколёсных транспортных средств/М.: «Энергия», 1976.
2. Н.А. Погарский. Электрические трансмиссии машин с мотор-колёсами / М.: «Машиностроение», 1965.
3. А.П. Пролыгин, А.Д. Машихин, А.Б. Миндалин. Регулирование двигателей постоянного тока в электроприводе колёсных машин / - «Электротехническая промышленность. Тяговое и подъёмно-транспортное электрооборудование», 1975, выпуск 2 (35).
4. П.В. Аксёнов, В.С. Поляков. Анализ схем силовой передачи автомобилей высокой проходимости / - «Автомобильная промышленность», 1968, №10.
5. Е.А. Андреев, П.А. Ровинский. Особенности работы синхронного генератора на вентильный преобразователь частоты соизмеримой мощности. - В кн.: Электромагнитные процессы в приводах с частотным управлением / Л.: «Наука», 1972.
6. И.Б. Барский. Конструирование и расчёт тракторов / М.: «Машиностроение», 1968.
7. В.Л. Роговцев. Автомобили и тракторы / М.: «Транспорт», 1986.
8. Мотор-редукторы, каталог / М.: ВНИИТЭМР, 1984.
9. Мотор-редукторы и редукторы, каталог / М.: МНИИТЭМР, 1986
10. Hydrostatic Transmission Printed in Denmark by Dantoss Litho - Copyright, 1998.
11. Gearing and Transmissions. International journal. 1997, №1, №2. 1998, №1, №2.
12. М.И. Абрамов, В.Е. Андреев, С.А. Уфимцев. Анализ конструкций трансмиссий многоцелевых колёсных и гусеничных машин и обоснование разборки электромеханической трансмиссии - В сб.: «Специальные главы теории автомобиля и трактора». Челябинск, издательство ЮУрГУ, 2001.
13. В.Е. Андреев, С.П. Баженов, А.А. Романченко, В.С. Индюков. К оценке уровня нагруженности автоматической бесступенчатой трансмиссии грузового автомобиля - В сб.: Конструирование и расчёт гусеничных машин. Выпуск 44, Челябинск, ЮУрГУ, 1977.
14. В.Е. Андреев Автоматические коробки передач автомобилей, «Автотехника», 1998, № 1 ,№2.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Глава 1 Электрические и электромеханические передачи, как элементы трансмиссий автомобилей и тракторов	3
1.1 Классификация передач и требования, предъявляемые к ним	3
1.2 Классификация электротрансформаторов крутящего момента	4
1.3 Основные требования к электропередачам и электро- трансформаторам	7
1.4 Схема и типовые конструкции электротрансформаторов	8
Глава 2 Электромеханические передачи	20
2.1 Двухпоточные передачи типа МР	21
2.2 Трехпоточные передачи	21
2.3 Комбинированные ЭМП	24
2.4 Принципы регулирования электротрансформатора	27
2.5 Порядок расчета электрических и электромеханических передач	29
Глава 3 Электромеханические трансмиссии с мотор-колесами	32
3.1 Описание схемы электромеханической трансмиссии с мотор-колесами	32
3.2 Выбор оптимальных тяговых характеристик электро- механической трансмиссии	34
3.3 Особенности проектирования мотор-колес	40
Глава 4 Компонувочные решения и типовой расчет привода	46
4.1 Компонувка мотор-колеса с однорядным редуктором	47
4.2 Компонувка мотор-колеса с двухрядным редуктором	48
4.3 Компонувка мотор-редуктора с расположением элементов при- вода в балке моста	51
4.4 Пример расчета планетарного редуктора двухрядной компоновки	53
4.5 Пример расчета стояночного тормоза	57
Библиографический список	60

Андреев Валентин Ефимович, Абрамов Максим Игоревич
Бесступенчатые электромеханические передачи
автомобилей и тракторов

Учебное пособие

Техн. редактор А.В. Миних
Издательство Южно-Уральского государственного Университета

Подписано в печать 22,12,2011, Формат 60х84 1/16 Печать цифровая .
Усл.печ.л.3,72. Тираж 50 экз. Заказ 476/183

УОП Издательства.454080, г.Челябинск,пр.им.В.И.Ленина,76