

С. А. КЕШУОВ

АВТОНОМНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
МОБИЛЬНЫХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
МАШИН

Алматы, 1993

КРЕШОВ С.А.

АВТОНОМНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МОБИЛЬНЫХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

АЛМАТЫ 1993

УДК 621. 371:621. 311

КЕШУОВ С.А. АВТОНОМНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МОБИЛЬНЫХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН. - Алматы, КазНИИИКИ, 1993. - 170с., ил.

В монографии рассмотрены вопросы синтеза структуры автономных систем передачи энергии к рабочим органам мобильных сельскохозяйственных машин, а также результаты разработки математической модели системы автономного электропривода.

Ил. - 47, табл. - 8, библиогр. - 79 назв.

Рецензенты: доктор технических наук С.Н. Асамбаев
кандидат технических наук, профессор М.И. Сылкин

ISBN 5-7667-2773-9

© С.А.Кешуов, 1993

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
I. ОБОСНОВАНИЕ ЗОН ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ К РАБОЧЕМУ ОРГАНУ В МОБИЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ АГРЕГАТЕ.	7
I.1. Системный подход к обоснованию зон оптимального применения различных устройств передачи энергии.	7
I.2. Цель и границы исследуемой системы	8
I.3. Синтез оптимальной структуры системы передачи энергии	II
I.3.1. Обоснование исходных данных для синтеза	II
I.3.2. Функциональный анализ систем передачи энергии	19
I.3.3. Характеристика задачи синтеза структуры системы и результаты синтеза	44
I.3.4. Синтез структуры системы по частным показателям	59
I.3.5. Рекомендации по выбору оптимальной системы передачи энергии	74
Выводы	77
2. ТЕОРИЯ МОБИЛЬНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ РАБОЧИХ ОРГАНОВ	80
2.1. Классификация режимов работы автономной системы электропривода мобильной машины	80
2.2. Системное моделирование процессов в автономном электроприводе	82
2.2.1. Уравнения первичного двигателя внутреннего сгорания мобильного энергетического средства.	83
2.2.2. Дифференциальное уравнение синхронного генератора мобильного энергетического средства	99

2.2.3. Дифференциальные уравнения асинхронных двигателей рабочих органов	I27
2.2.4. Учет соединительных кабелей и уравнения связи	I31
2.2.5. Уравнения системы автономного электропривода в относительных единицах	I33
Выводы	I43
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	I44
ПРИЛОЖЕНИЯ	I50

ВВЕДЕНИЕ

В сельскохозяйственном производстве многие технологические процессы выполняются при помощи мобильных машин с активными рабочими органами. Научно-технический прогресс способствует дальнейшему расширению масштабов и областей применения, сложности и ответственности выполняемых такого рода машинами функций. Поэтому, повышение их эффективности рассматривается как важный фактор повышения эффективности всей отрасли.

Важнейшей частью мобильных сельскохозяйственных машин, непосредственно влияющей на качество технологического процесса является привод рабочих органов. При проектировании систем приводов малой мощности, всегда возникают альтернативные варианты, среди которых конкурентноспособными являются электрические, механические и гидравлические системы. Например, в сельскохозяйственном машиностроении встречаются случаи, когда агрегаты с одинаковыми приводными характеристиками имеют разные системы приводов, так широкозахватные семябрусные косилки разрабатывались с механическим, электрическим и гидрообъемным приводом рабочих органов. Другими словами при проведении НИР и ОКР не стремились к отысканию обязательно оптимальной системы. Задача конструирования считалась успешно решенной, если удавалось найти какую-либо строго допустимую систему по частному критерию эффективности, удовлетворяющую совокупности исходных данных и ограничений.

Следовательно, назрела необходимость в обосновании методов синтеза структуры автономных систем передачи энергии к рабочим органам мобильных сельскохозяйственных машин. Требуют дальнейшей разработки вопросы оптимизации параметров систем автономного электропривода рабочих органов на базе математических моделей, позволяющих рассчитывать все режимы системы с учетом взаимосвязей входящих в нее элементов: двигатель внутреннего сгорания — синхронный генератор — асинхронные двигатели — рабочие органы.

Все это свидетельствует об актуальности проблемы выявления закономерностей выбора различных типов приводов и построения оптимальных систем электроприводов и на их основе повышения

эффективности мобильных сельскохозяйственных машин.

Поставленные задачи в настоящей работе решены на основе принципов системного подхода. Объект исследования - автономная система передачи энергии от вала отбора мощности трактора к рабочему органу, состоящая в общем случае из преобразователя механической энергии в другой вид энергии, устройства передачи энергии, обратного преобразователя энергии и аппаратуры управления и защиты.

Обоснована система показателей качества исполнения приводом главной функции. Определены зоны оптимального применения механической, гидравлической и электрической систем приводов рабочих органов в зависимости от функционального назначения, величины передаваемой мощности, расстояния передачи и числа рабочих органов. При этом синтез структуры системы проводился по двум результирующим показателям качества исполнения системами главной функции - эффективности и стоимости.

Разработаны классификация режимов технологического цикла использования мобильных электрифицированных агрегатов и математическая модель системы автономного электропривода.

1. ОБОСНОВАНИЕ ЗОН ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ К РАБОЧЕМУ ОРГАНУ В МОБИЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ АГРЕГАТЕ

1.1. Системный подход к обоснованию зон оптимального применения различных устройств передачи энергии

Наиболее эффективным инструментом для решения поставленной задачи является системный подход – наиболее общая категория в системных исследованиях, которая исходит, главным образом, из комплексности анализа объекта и строгой систематизации исследования. Наиболее важной концепцией системного подхода является четкое представление о том, что система никоим образом не должна рассматриваться как простая сумма своих элементов, необходимо исходить из принципа взаимосвязи и взаимообусловленности явлений, исследуя объект не только как самостоятельную систему, но и как часть некоторой системы более высокого уровня /56 /.

Основными принципами системного подхода являются категории целостности, сложности и организованности. Принцип целостности предполагает исследование некоторого конкретного объекта, имеющего специфические закономерности функционирования, обособленно от других объектов, не упуская из виду связи исследуемого объекта с другими. В соответствии с принципом сложности, внутренние процессы системы должны рассматриваться в комплексной зависимости как от внешних, так и от внутренних факторов, что и отличает системный подход от механистического (элементаристского), по которому внутреннее состояние объекта может полностью определяться внешними факторами и именно поэтому приводящему к не строго оптимальным решениям. Категория организованности подразумевает анализ структурной упорядоченности исследуемых систем /56,60 /.

Важным преимуществом системного подхода является то, что он не только позволяет выполнить анализ объекта, но и осуществить синтез, т.е. найти систему, оптимальную для заданных условий. Но в то же время системный подход не является методом

универсального решения проблемы, он является методом разработки поиска оптимального решения и гарантирует учет всех существенных факторов /23, 56, 60, 71 /.

1.2. Цель и границы исследуемой системы

Машино-тракторный агрегат (МТА) представляет собой сложную искусственную материальную систему – совокупность множества объектов, объединенных выполнением ряда задач. Рассмотрим диаграмму функций МТА совмещенную с ее схемой (рис. I.1), составленную по принципам соответствия системы цели. В общем случае МТА состоит из трактора *Тр* и сельскохозяйственной машины СХМ. Функциональное назначение трактора, выработка энергии посредством первичного двигателя внутреннего сгорания ДВС и транспортировка всего агрегата при помощи своей трансмиссии и ходовой части *ТнХЧ*. СХМ обеспечивает доставку рабочего органа к определенной точке пространства относительно трактора через сцепку и несущую конструкцию *Сц* и *НК*, приводом *Пр* передает энергию, снятую с вала отбора мощности (ВОМ) трактора к рабочему органу *РО*, предназначенному для проведения технологического процесса – цели функционирования МТА.

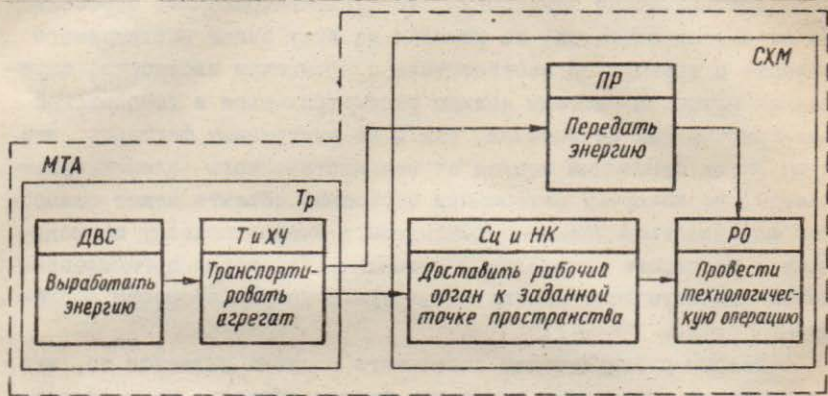


Рис. I.1. Диаграмма функций МТА совмещенная с ее схемой.

В соответствии с принципом целостности, границы исследуемого объекта определим, разделив МТА на две части, одна из которых, привод Пр рабочих органов, сама может рассматриваться как некоторая самостоятельная "система передачи энергии", другая - как внешняя среда или метасистема.

Цель функционирования выделенной системы S передачи энергии заключается в передаче энергии от первичного источника, ВОМ трактора, к непосредственно рабочим органам и в соответствии с иерархией целей подчиняется цели метасистемы.

Система S передачи энергии в общем случае состоит из преобразователя механической энергии в другой вид энергии П, устройства передачи энергии ПЭ, двигателя Д, осуществляющего обратное преобразование энергии и аппаратуры управления АУ (рис. I.2), т.е. в соответствии с принципом иерархии систем, в свою очередь является совокупностью элементов с известными свойствами и с упорядоченными связями между элементами и свойствами, ориентированными на выполнение главной функции.

На вход системы передачи энергии подается механическая энергия, на выходе также снимается механическая энергия, система органически связана с двигателем ДВС и рабочим органом РО, входящими в состав метасистемы. Таким образом, выделенная часть МТА обладает всеми системообразующими признаками.

Отличительная особенность анализируемого объекта - полная детерминированность номенклатуры и числа элементов и связей внутри системы, а также основных связей с внешней средой, что способствует эффективному решению поставленной задачи.

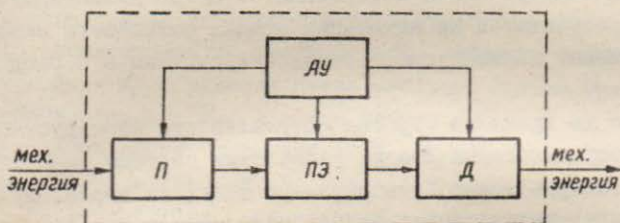


Рис. I.2. Схема системы передачи энергии.

Систему следует анализировать во времени и пространстве. Для описания системы в пространстве мы определили ее границы и внешнюю среду. Для описания системы во времени необходимо ввести понятие, отражающее период существования системы. Принято использовать для этого понятие "жизненный цикл". Последний условно исчисляется от начала работ по созданию аналога и технического задания на систему до полной деградации, которая завершается снятием системы вначале серийного производства, а затем с эксплуатацией / 56 /.

Различают два генеральных периода жизненного цикла: развитие системы и целевое функционирование. Каждый из них характеризуется специфическим комплексом процессов, из которых складываются основные этапы жизненного цикла. Период развития состоит из трех основных этапов: научно-исследовательские работы (НИР), опытно-конструкторские работы (ОКР) и серийное производство. Период целевого функционирования состоит из этапов транспортировки к месту применения, пуска-наладочных работ, использования по назначению, чередующегося с ним технического обслуживания и ремонта, хранения и модернизации. Окончание периода функционирования определяется по наступлению предельного состояния оборудования, которое характеризуется возникновением неустраняемых нарушений требований безопасного или эффективного применения.

Каждый из периодов вносит свой вклад в формирование свойств системы передачи энергии. Обеспечение свойств начинается на этапе НИР и ОКР. Именно по этой причине нами поставлена задача определения зоны оптимального применения систем передачи энергии различных принципов построения, с целью дальнейшего использования результатов на начальных этапах разработки машины, что обуславливает наивысшую эффективность системы в период функционирования.

В то же время не строгая оптимальность конструктивного решения, допущенного на стадии разработки системы передачи энергии, достоверно может быть выявлена только в период функционирования или эксплуатации машины, поскольку именно в этой части жизненного цикла неопределенность информации о системе снимается почти полностью и результирующие показатели системы могут

быть определены с достаточной точностью. Следовательно, для решения поставленной задачи, целесообразно различные типы систем передачи энергии сравнивать для отрезка времени, соответствующего стадии использования по назначению.

Кроме того, если сравнить все стадии жизненного цикла машины по затратам и получаемой от него отдаче, то приходим к выводу об исключительном значении стадии использования, единственной стадии жизненного цикла, имеющей положительную эффективность, т.е. наряду с затратами на агрегат происходит отдача от вложенных средств. По этому критерию стадия использования является самой важной в жизненном цикле /23 /.

Исходя из вышеприведенного поиск зон оптимального использования различных типов систем передачи энергии базируется на следующих принципах и допущениях:

- объектом изучения является система, состоящая в общем случае из преобразователя механической энергии в другой вид энергии, устройства передачи энергии, двигателя рабочего органа и аппаратуры управления;

- цель системы - передать энергию от первичного источника к рабочим органам;

- сравнение типов системы производим для отрезка времени, соответствующего стадии использования по назначению.

1.3. Синтез оптимальной структуры системы передачи энергии

1.3.1. Обоснование исходных данных для синтеза

Определение зон оптимального использования различных типов систем передачи энергии сводится к синтезу оптимальной структуры системы, т.е. отысканию оптимальных принципов построения системы для заданных условий функционирования.

Синтез структуры системы состоит из двух основных этапов: обоснование исходных данных и синтеза структуры для сформированных исходных данных.

Исходные данные обосновываются путем всестороннего рассмотрения условий работы системы и требований, предъявляемых к системе, исходя из ее цели. Установим основные факторы, которые действуют на систему в рамках ее пространственно-временных харак-

теристик, определяют качество выполнения ее цели функционирования. При этом необходимо обеспечить наиболее полный охват, описание и распределение их по признакам общности и по влиянию на достижение цели / 23 /.

Все множество факторов, влияющих на качество системы по признаку отношения к ней, разделим на три совокупности: внутренние, относящиеся непосредственно к системе, внешние, характеризующие окружающую среду, и ограничения на структуру и параметры системы.

Внутренними факторами выступают эксплуатационные свойства системы S передачи энергии, выраженные вектором $K = \langle K_2, C \rangle$ показателей качества системы, где K_2 - эффективность системы, характеризующий качество выполнения системой цели функционирования; C - экономические свойства, характеризующие затраты, расходуемые на выполнение цели.

Эффективность является функцией групповых показателей качества системы

$$K_2 = f(K_N, K_T, K_{ЭН}, K_{ТН}, K_{ЭР}). \quad (I.1)$$

Групповые показатели в свою очередь определяются единичными показателями качества:

надежность $K_N = \{ \rho(t) \}$;

технические показатели $K_T = \{ m_p, n_{св}, T_p \}$;

энергетические показатели $K_{ЭН} = \{ \eta, M_{П}, M_{т} \}$;

технологические показатели $K_{ТН} = \{ B_в, B_о \}$;

эргономические показатели $K_{ЭР} = \{ N_в \}$.

Надежность системы, при оценке ее для определенного времени функционирования агрегата, в рассматриваемом случае в течение стадии использования по назначению, исчерпывающим образом может быть представлена одним показателем, вероятностью безотказной работы $\rho(t)$ - вероятностью того, что продолжительность работы изделия до отказа будет не меньше заданного времени / 54 /.

Техническими показателями являются рабочая масса m_p , степень свободы рабочего органа $n_{св}$ и типоразмерный ряд T_p .

Понятие "рабочей массы" m_p , введенное в данной работе, в

отличие от паспортного значения массы комплектующих элементов системы передачи энергии, учитывает все дополнительные массы, неизбежно появляющиеся в связи с установкой и обеспечением функционирования объекта и позволяет оценить действительную массу системы. Например, для обеспечения работы гидронасоса или генератора, их следует установить на специальной площадке, обладающей определенной массой, или работа гидропривода невозможна без рабочей жидкости, заливаемой в систему, массу которой также необходимо учитывать.

Степень свободы рабочего органа характеризуем углом поворота оси рабочего органа, допускаемым системой передачи энергии, относительно неподвижной оси соответствующей среднему положению рабочего органа.

Типоразмерный ряд T_p определяет выпускаемую промышленностью номенклатуру оборудования по мощности. Чем чаще шкала типовых размеров, тем точнее можно подобрать оборудование к условиям эксплуатации.

Энергетические показатели выражают способность объекта передавать энергию с высокой эффективностью и приспособленность к переходным режимам работы. Соответствующими единичными показателями являются к.п.д. η , кратность пускового момента M_n и кратность максимального момента M_m .

Технологические показатели характеризуют соответствие оборудования агроантропотехнологическим требованиям и включают безвредность B_g и безопасность B_o .

Эргономические показатели определяют соответствие систем психофизическим возможностям P_g обслуживающего персонала.

Экономические свойства C характеризуем приведенными затратами, состоящими из суммы капитальных вложений K приведенных к одному году при помощи коэффициента нормативной эффективности E_n и годовых текущих затрат, т.е. издержек производства I

$$C = E_n K + I. \quad (I.2)$$

Использование этого критерия в данном случае оправдано, поскольку анализируемые варианты построения систем равноценны по вы-

полняемой цели.

Приведенные единичные показатели связаны с качеством системы строго монотонной зависимостью, чем больше (чем меньше) показатель, тем лучше система при прочих равных условиях, следовательно они соответствуют существующему определению показателя качества /19 /.

На практике скрупулезный учет в отдельности всех вышеприведенных единичных показателей качества при синтезе структуры системы, только усложняет исследование, делает невозможным аналитическое описание закономерностей их изменения при изменяющихся условиях эксплуатации (например, показатели безвредности, безопасности и эргономичности можно оценить только в баллах) и не дает реального выигрыша от повышения точности расчета.

Поэтому, синтез целесообразно проводить на основе следующих показателей качества, которые наиболее часто используются при сравнительном анализе систем передачи энергии: надежность, масса, к.п.д. и стоимость. Эти четыре показателя обладают свойствами комплексных, поскольку естественным образом учитывают некоторые из оставшихся единичных показателей, другие можно ввести в них искусственно.

Показатели типоразмерный ряд, кратность пускового момента и кратность максимального момента непосредственно учитываются массой, к,п,д. и стоимостью систем, например, использование гидромотора значительно большей мощности, чем необходимо, из-за редкой шкалы типоразмерного ряда приводит к росту массы и стоимости системы гидропривода и снижению его к.п.д. Тот же результат дает выбор более мощной электро- или гидромашины по критерию условий пуска или перегрузочной способности.

Другие показатели системы - степень свободы рабочего органа, безвредность, безопасность и эргономичность, превратим в константы, т.е. приведем к одному уровню путем проведения технических мероприятий: усовершенствования устройства ориентации рабочего органа в пространстве, закрытия кожухами и решетками вращающихся частей систем, использования устройств защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током; повышения надежности и герметичности соединений в системе гидропри-

вода, выведения пульта управления системы в кабину трактора, использования виброгасящих прокладок при установке машин и т.д. /62/. Эти мероприятия приводят к повышению массы систем, изменению надёжности и росту стоимости, следовательно, учитываются выбранными показателями.

Таким образом, комплексные показатели надёжность, масса, к.п.д. и стоимость объединяют все II единичных показателей. Тогда эффективность запишем как

$$K_3 = f[\rho(t), m_p, \varrho]. \quad (I.3)$$

Внешними факторами, влияющими на качество системы, являются условия эксплуатации $Y = \{Y_u, Y_b, Y_p\}$. Условия эксплуатации определяют:

условия использования $Y_u = \{\Phi, \rho, \ell, n\}$;

дестабилизирующие воздействия $Y_b = \{Y_{b1}, Y_{b2}, Y_{b3}, \dots, Y_{b8}\}$;

режимы работы $Y_p = \{Y_{p1}, Y_{p2}, Y_{p3}, \dots, Y_{pn}\}$.

Условия использования характеризуются показателями метасистемы, определяющими параметры объекта: функциональным назначением Φ рабочего органа по роду движения (вращательное $\Phi_{вр}$ или возвратно-поступательное $\Phi_{пост}$); потребляемой рабочим органом СХМ мощностью P ; расстоянием ℓ между рабочим органом и ВОМ трактора; числом n рабочих органов.

Дестабилизирующие воздействия включают совокупность факторов внешней среды, которые вызывают отклонение показателей свойства надёжности системы передачи энергии от номинальных значений и приводят к отказам оборудования, а также влияют на устойчивость работы системы. К числу первичных показателей этих воздействий относятся климатические условия Y_{b1} , запыленность Y_{b2} , влажность Y_{b3} , уровень вибраций Y_{b4} , условия хранения Y_{b5} , условия пуска рабочего органа Y_{b6} , режим работы рабочего органа Y_{b7} и режим работы ДВС Y_{b8} .

Комплексную оценку показателей $Y_{b1}, Y_{b2}, Y_{b3}, Y_{b4}$ производим по методике ВИЭСХ — условия считаются легкими, когда отсутствуют указанные воздействия, нормальными — когда имеется одно из них, тяжелыми — при наличии двух и более воздействий.

Режимы работы системы — это состояния системы,

определяющиеся множеством различных процессов, обусловленных последовательностью операций, необходимых для проведения технологического процесса. В общем случае, режимы работы системы передачи энергии включают пуск системы, проведение технологического процесса и выключение системы. Подробная классификация режимов работы будет приведена ниже.

Последняя группа факторов, влияющих на качество системы - ограничения O_S , накладываемые на структуру и параметры систем

$$O_S = \{O_{SM}, O_{SC}, O_{Sg}, O_{Sf}, O_{Sg}, O_{Ssz}, O_{Sp}, O_{S\omega}, O_{Su}, O_{Sl}, O_{S\phi}\}. \quad (I.4)$$

Приняты следующие ограничения на структуру систем передачи энергии: ограничение O_{SM} множества M_{ca} строго допустимых систем типа дискретности, рассматриваются три вида систем - система электропривода S_2 (промышленной S_{21} и повышенной частоты S_{22}), гидропривода S_f и механическая S_M ; в системах используются серийные агрегаты, механизмы и детали машин (O_{SC}); автономная система электропривода переменного тока состоит из синхронного генератора и асинхронного двигателя (O_{Sg}); в системе гидропривода используется гидрообъемная передача, как наиболее приспособленная к заданным условиям эксплуатации (O_{Sf}); в системе электропривода предусмотрено устройство форсирования возбуждения генератора, позволяющее осуществить частотный пуск двигателя (O_{Sg}).

Ограничения на регулируемые параметры систем: напряжение и частоту системы электропривода (O_{Sfz}); давление в системе объемного гидропривода (O_{Sp}); регулирование скорости рабочего органа ($O_{S\omega}$); передаваемую мощность и расстояние, на которое она передается $O_{Su} = \{P \leq P_{max}, l \leq l_{max}\}$; число и функциональное назначение рабочих органов ($O_{S\phi}$). Таким образом, совокупность исходных данных можно записать как $D = \{CK, Y, O_S\}$. Здесь символ **CK** означает, что речь идет не о величине составляющих вектора **K**, а лишь о составе этого вектора.

В рассматриваемом случае ввести обоснованный объективными методами результирующий показатель эффективности K_2 , являющийся известной функцией $f(k_{...})$ показателей качества, не удастся. Поэтому, зависимость (I.3) была сформирована эвристическим мето-

дом, в частности, методом экспертных оценок в виде целевой функции

$$\left. \begin{aligned} K_3 &= \sum_{i=1}^m C_{3i} K_i', \\ K_i' &= \frac{K_i}{K_{i\bar{g}}}, \quad i = 1, m, \\ \sum_{i=1}^m C_{3i} &= 1, \quad C_{3i} > 0, \quad i = 1, m. \end{aligned} \right\} \quad (I.5)$$

Здесь K_i' - нормированный единичный показатель качества; K_i - численное значение показателя качества; $K_{i\bar{g}}$ - его базисное значение; C_{3i} - весовые коэффициенты или "веса" единичных показателей.

В состав экспертов были включены крупные ученые, имеющие большой опыт разработки и эксплуатации систем, близких к рассматриваемому. Экспертиза осуществлялась индивидуально методом попарного сопоставления показателей.

Среднее арифметическое значение веса i -й характеристики по мнениям всех экспертов определяют по формуле

$$\bar{K}(i) = \frac{\sum_{j=1}^m K(j, i)}{n_3}, \quad (I.6)$$

где $K(j, i)$ - веса или ранги показателей качества; i - номер эксперта ($i = 1, 2, \dots, n_3$); j - номер показателя ($j = 1, 2, \dots, m$). Полагаем, что истинное значение исследуемой величины находится внутри диапазона оценок и что обобщенное коллективное мнение является вполне достоверным.

Степень согласованности экспертов оценивается статистическими и эвристическими показателями. Статистическими показателями являются дисперсия и коэффициент вариации.

По каждому оцениваемому фактору j дисперсия весов оценок экспертов

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^m [K(j, i) - \bar{K}(i)]^2}{m}, \quad (I.7)$$

и коэффициент вариации j -го показателя

$$v_j = \frac{\sigma_j}{\bar{K}(L)} \quad (I.8)$$

Окончательные выводы о согласованности мнений экспертов формируются по общей совокупности характеристик и факторов с помощью эвристических показателей. Эвристическим показателем является коэффициент конкордации (согласованности) или критерий Кендалла /47,68 /

$$W = \frac{12 \sum_i^m d_i}{n_j^2 (m^3 - m) - n_j \sum T_j} \quad (I.9)$$

где $d_i = S_i - \bar{S}$ - отклонение суммы рангов от среднего арифметического значения; $S_i = \sum \rho_i$ - сумма рангов по j -й характеристике; $\bar{S} = \sum S_j / m$ - среднее арифметическое значение суммы рангов по всем показателям; ρ_i - ранг оценки веса j -го показателя; $T_j = \sum_i^L (t_i^2 - t_i)$ - показатель связности рангов; t_i - число связанных рангов в l -й группе; L - число групп рангов.

Результаты обработки мнений экспертов даны в табл. I. I.

Таблица I. I.

Результаты ранжирования показателей эффективности системы передачи энергии

Показатель	Надежность	К.п.д.	Масса
Ранг	1	2	3
"Вес"	0,381	0,333	0,286

Тогда целевая функция (I.5) запишется как

$$K_3 = C_{31} p'(t) + C_{32} \varphi' + C_{33} m'_p = 0,381 p'(t) + 0,333 \varphi' + 0,286 m'_p \quad (I.10)$$

Результаты ранжирования и коэффициент конкордации $W = 0,43$ показывают, что ни один из показателей не обладает явным преимуществом перед другими, что соответствует сложившейся практике сравнительного анализа различных систем приводов.

1.3.2. Функциональный анализ систем передачи энергии

Эксплуатационные свойства являются выходными параметрами системы. Для того, чтобы учесть при синтезе уровень функционально-структурного совершенства или организованности системы, необходимо оценить и внутренние характеристики самих систем путем использования функционально-структурного подхода.

Функционально-структурный подход с одной стороны концентрирует внимание на общности функций, позволяет в технических системах, имеющих функциональную природу, охватывать разнообразие протекающих в них процессов, при этом объект рассматривается не в его конкретной форме, а как совокупность функций. С другой стороны, поскольку функции реализуются лишь в структуре, позволяет абстрагируясь от связей системы с внешней средой, изучить структуру системы, т.е. элементы и их взаимосвязи внутри системы.

Для проведения функционально-структурного анализа систем, в соответствии с ограничением O_{SM} на их структуру, предварительно рассмотрим устройство системы электропривода^{и гидравлического} и механической.

Система S_2 автономного электропривода представляет собой совокупность устройств для преобразования и передачи энергии посредством электромагнитного поля. Она состоит из синхронного генератора автономного питания, подключенного к трансмиссии Т трактора, кабельной линии Л, служащей для передачи электрической энергии к асинхронному двигателю М и привода рабочего органа, блока компаундирования БК, поддерживающего напряжение генератора в допустимых пределах при изменении величины тока и коэффициента мощности двигателя, автомата QF осуществляющего отключение цепи и максимальную токовую защиту, магнитного пускателя КМ для дистанционного управления электроприводом и защиты его от перегрузок, защитно-отключающего устройства ЗОУП, обеспечиваю-

шего автоматическое отключение электроустановки при возникновении условий поражения электрическим током, а также электроизмерительных приборов (рис. I.3,а).

Система S_r объемного гидравлического (гидростатического) привода представляет собой совокупность устройств для преобразования и передачи энергии посредством рабочей жидкости под давлением. В такого рода системах используют объемные гидромашины, рабочий процесс которых основан на попеременном заполнении рабочей камеры жидкостью и вытеснении ее из рабочей камеры. Для привода рабочих органов сельскохозяйственных машин, используют простые схемы разомкнутого гидрообъемного привода, состоящего из насоса I, подключенного к трансмиссии трактора, засасывающего рабочую жидкость из гидробака I3 по всасывающей гидролинии I4 и нагнетающего его по напорной гидролинии 2 в гидродвигатель 8 привода рабочего органа, преобразующего энергию потока рабочей жидкости в механическую энергию, откуда она по сливной гидролинии 9 возвращается в бак (рис. I.3,б). Между насосом и гидродвигателем включают гидрораспределитель 7, назначением которого является изменение согласно внешнему управляющему воздействию направления движения потока жидкости, т.е. в данном случае для включения и отключения гидромотора. Предохранительный клапан 3 ограничивает верхний предел давления в системе. Гидравлический аккумулятор 6 накапливает потенциальную энергию жидкости, и использует ее в случае кратковременного повышения интенсивности работы гидродвигателя и при понижении расхода насоса, а также уменьшает пульсации давления в системе. Обратный клапан 5 служит для пропускания рабочей жидкости только в одном направлении. Для очистки рабочей жидкости от загрязнений на сливной гидролинии устанавливается фильтр IO. Для контроля за давлением в напорной гидролинии насоса служит манометр 4, температура рабочей жидкости в гидробаке измеряется дистанционным термометром II, наличие жидкости щупом I2 /8, 13, 14, 16, 42, 66/.

Система S_m механического привода, это совокупность устройств для передачи механической энергии, состоящая из карданных валов 3 для передачи вращающего момента под переменным углом и подключенных между трансмиссией T трактора и валом 5, а также между другим валом 7 и рабочим органом PO, фрикционной муфты I для предохранения системы от разрушительных нагрузок, ус-

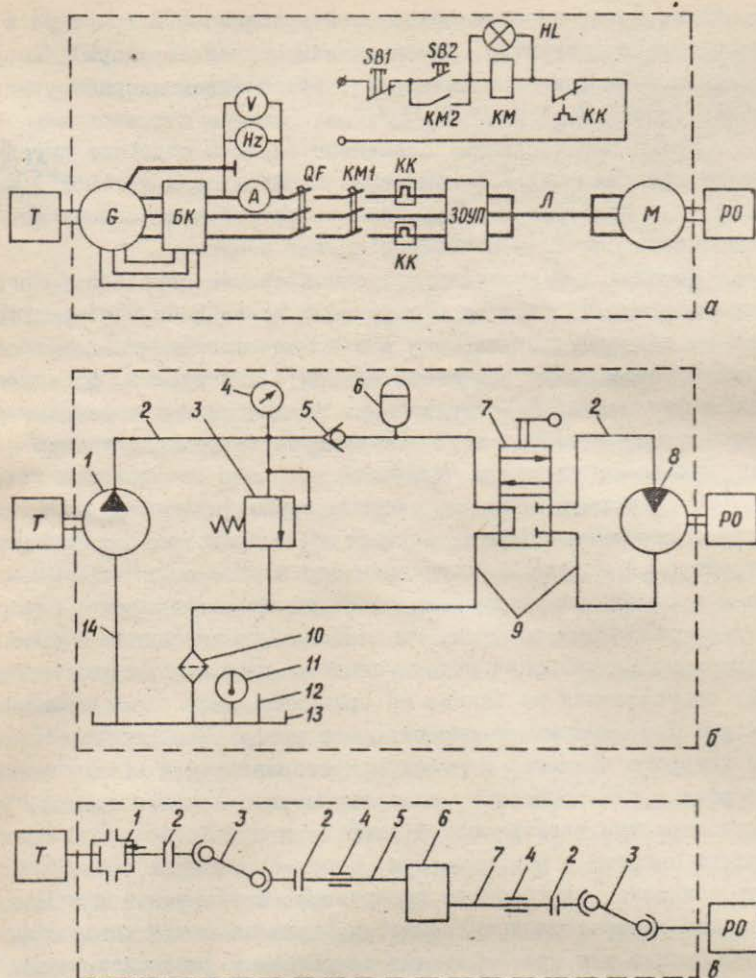


Рис. I.3. Принципиальные схемы систем передачи энергии.
 а- система автономного электропривода; б- система
 объемного гидропривода; в- механическая система.

тройства 6 согласования скоростей вращения ВОМ трактора и рабочего органа (редуктор, ременная или цепная передача), соединительных муфт 2 и подшипников 4, обеспечивающих работу длинных валов (рис. I.3, в) /1,20,52,53/.

Кроме перечисленных элементов системы содержат передачу между трансмиссией Т и машинами, площадки для установки машин, шкафы для приборов и оборудования, устройства повышающие безопасность систем и некоторые другие элементы.

Комплексный анализ приведенных систем передачи энергии и исследование их структуры и функций проводим путем представления их моделями, получаемыми с помощью различных методов описания. Воспользуемся описанием систем: структурным, функциональным и функционально-структурным. Каждое из них порождает соответствующие виды моделей: - структурную, функциональную и функционально-структурную /18,26,46,54/.

Структурное описание системы, ориентированное на материальное строение объекта, осуществим посредством графической структурной модели - упорядоченного изображения элементов системы и отношений между ними, дающего представление о материальных составляющих объекта, их основных взаимосвязях и уровнях иерархии. Структурная модель системы автономного электропривода, составленная на основе ее принципиальной схемы, приведена на рис. I.4. Она имеет вид связного графа типа дерева, основанием которого являются комплексы преобразователя механической энергии в электрическую, аппаратуры управления и защиты, устройства передачи электрической энергии и преобразователя электрической энергии в механическую. Комплексы в свою очередь содержат комплекты синхронного генератора, конструкции для присоединения генератора к трансмиссии, пускозащитной аппаратуры и конструкции для присоединения двигателя к рабочим органам. Комплекты однозначно распадаются на сборочные единицы или элементы: синхронный генератор, блок компаундирования, площадка и другие. Как видим, модель не содержит контуров и перекрестных связей между элементами различных уровней и представляет собой "скелет" системы со строгой и однозначной соподчиненностью материальных элементов, расположенных по уровням иерархии (комплексы - комплекты - сборочные единицы).

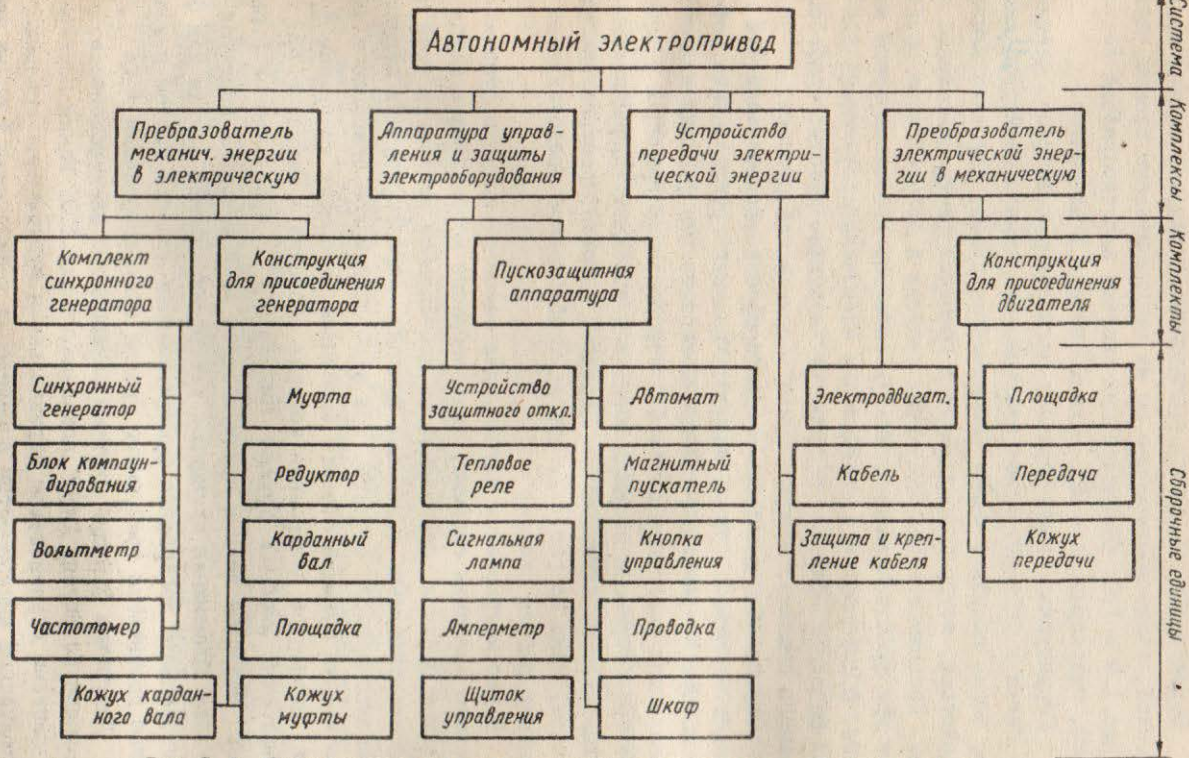


Рис. I.4. Структурная модель системы автономного электропривода.

Структурные модели систем объемного гидропривода и механической, также построенные по их принципиальным схемам, даны на рис. I.5 и I.6. Количественно система электропривода состоит из 26, гидропривода - 28, механическая - 7 элементов.

Структурная схема отражает наиболее устоявшиеся, статические связи в системе. Дополнительные сведения о свойствах системы можно получить через динамические связи, действия и взаимодействия, которые происходят в процессе функционирования системы. Возможность познания этих свойств в большой мере появляется при функциональном описании системы, т.е. логическом описании, формулировке и определении взаимосвязей функций. Для этих целей на практике используют следующие методы: профессионального анализа, "черного ящика", логической цепочки.

Определение функций методом профессионального анализа производят на основе опыта, мнений и позиций группы специалистов. При методе "черного ящика" предполагают, что функция является проявлением поведения объекта в определенных границах в результате трансформации входных величин в выходные. Принципиальные функциональные схемы систем передачи энергии, построенные этим методом, даны на рис. I.7, они дают обобщенное представление о принципе работы систем.

В рассматриваемом случае, для наиболее полного функционального описания системы, целесообразно использовать метод логической цепочки, основанный на постепенном раскрытии всей цепи последовательно связанных функций, характеризующих структуру анализируемого объекта. При этом логическое описание и систематизацию функций объекта выполняем на основе диаграммы функций, процедура построения которых обобщена в методике *FAST* (*Functional Analysis System Technique*) предложенной Г.Бейтузем. Наиболее важным преимуществом этой методики является возможность применения принципов детерминированной логики для формализованного построения функциональных моделей систем с возможностью достижения требуемого уровня абстрагирования / 18 /.

Диаграмма функций системы автономного электропривода, построенная по методу *FAST* показана на рис. I.8. Рамки исследуемой системы ограничиваем вертикальными пунктирными линиями. Практическим инструментом определения взаимосвязи функций яв-

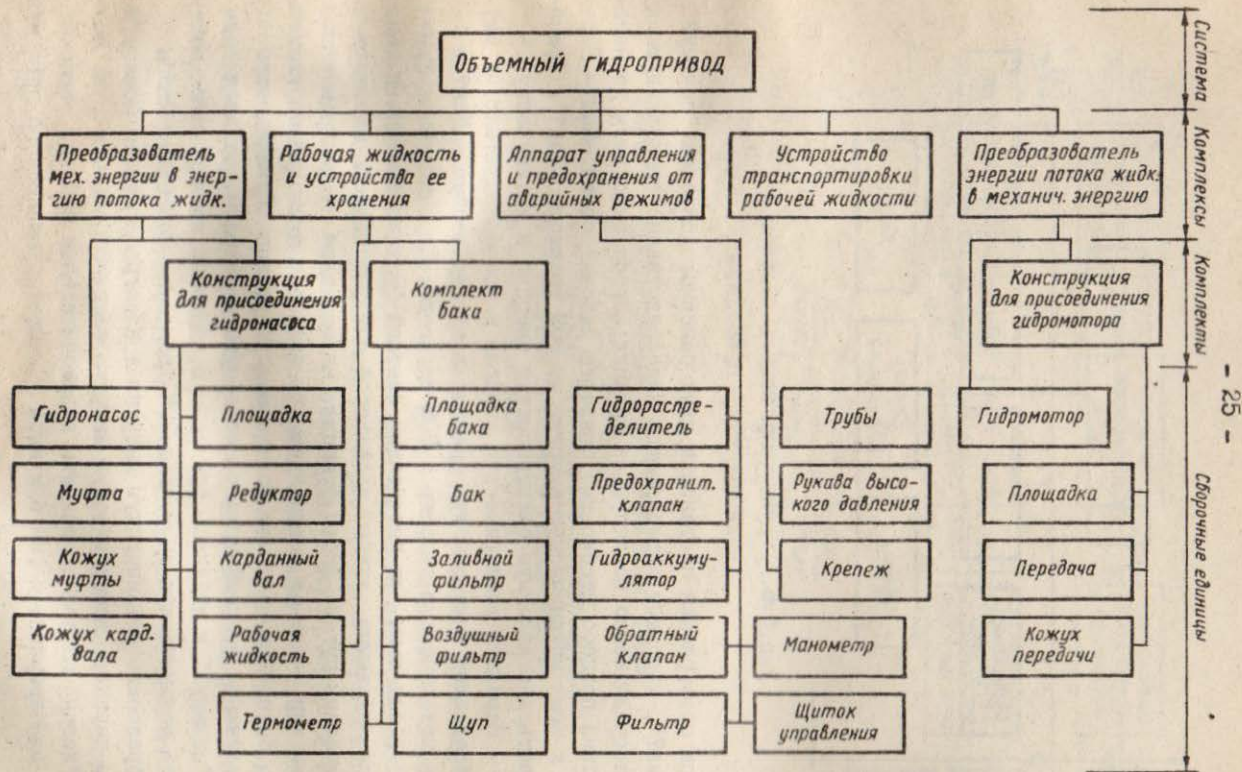


Рис. I.5. Структурная модель системы объемного гидропривода.

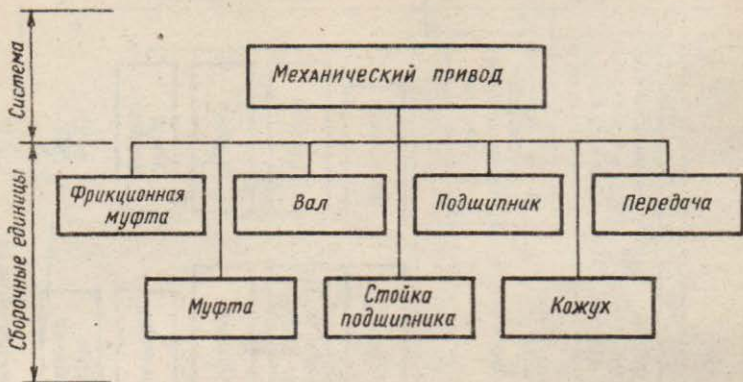


Рис.1.6. Структурная модель системы механического привода.

ляется повторяемая постановка двух основных вопросов "почему?" и "как?", которыми определяются непосредственно предшествующая и непосредственно последующая функция: -Чтобы выполнить технологический процесс необходимо привести рабочий орган. -Как? - Передать к нему механическую энергию от ВОМ трактора. -Как? - Преобразовать доставленную электрическую энергию в механическую. - Как? - Передать электрическую энергию к преобразователю. - Как? - Преобразовать механическую энергию в электрическую. - Как? - Снять механическую энергию с ВОМ трактора. Перечисленные функции обязательны для реализации главной функции системы и являются основными, линию, на которой они расположены называют критическим путем. Любая функция, находящаяся на диаграмме справа или слева от анализируемой, является функцией соответственно более высокого или более низкого уровня. Правильность расположения функций критического пути проверяем, задавая вопрос "почему?" и двигаясь при этом в обратной последовательности: -Снять механическую энергию с ВОМ трактора. -Почему? - Чтобы преобразовать механическую энергию в электрическую. - Почему? - Чтобы передать электрическую энергию на расстояние, и т.д. Вопрос "когда" позволяет выявить вспомогательные функции, выполняемые одновременно с той или иной функцией критического пути или

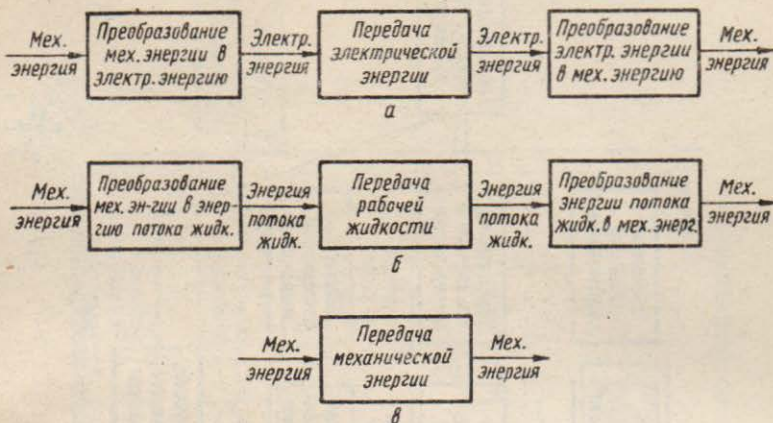


Рис. I.7. Принципиальные функциональные схемы систем передачи энергии.

- а - система автономного электропривода;
- б - система объемного гидропривода;
- в - механическая система.

обусловленные ею. Так, кроме выполнения основных функций, система вдоль всего критического пути, должна обеспечить безопасность и удобство обслуживания, для получения электрической энергии необходимо установить преобразователь и осуществить компаундирование напряжения, при передаче электроэнергии обеспечить защиту электрооборудования и коммутацию, а также степень свободы рабочего органа, и наконец, чтобы преобразовать электрическую энергию в механическую следует обеспечить установку у рабочего органа двигателя.

Диаграммы функций других систем, построенные аналогично, приведены на рис. I.9 и I.10.

На основе структурной модели и диаграммы функций систем

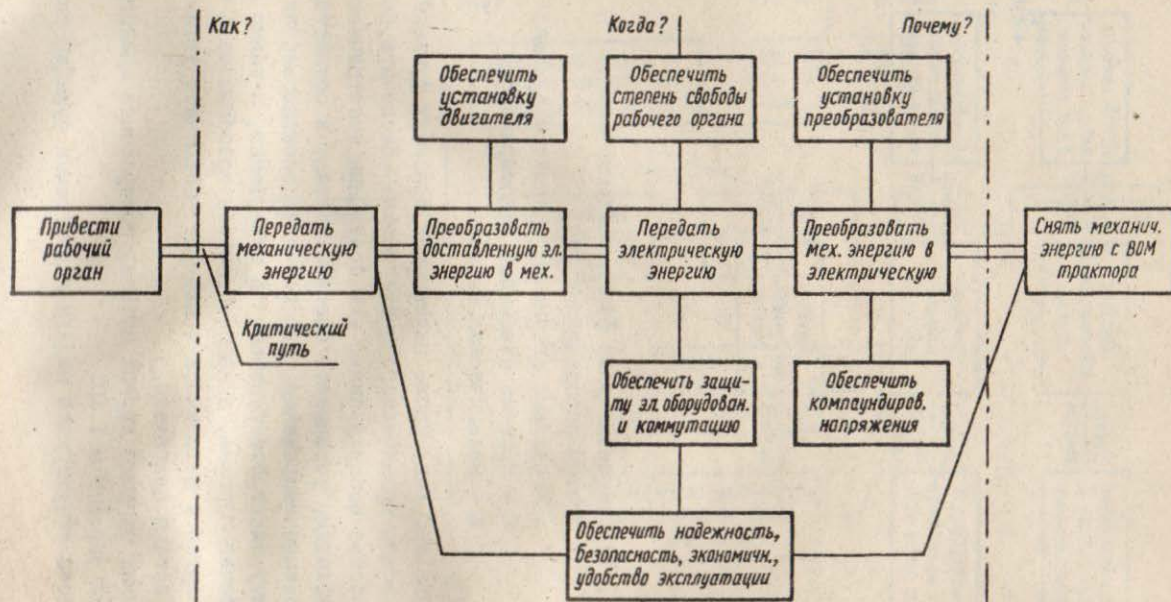


Рис.1.8. Диаграмма функции системы автономного электропривода (по методу FAST).

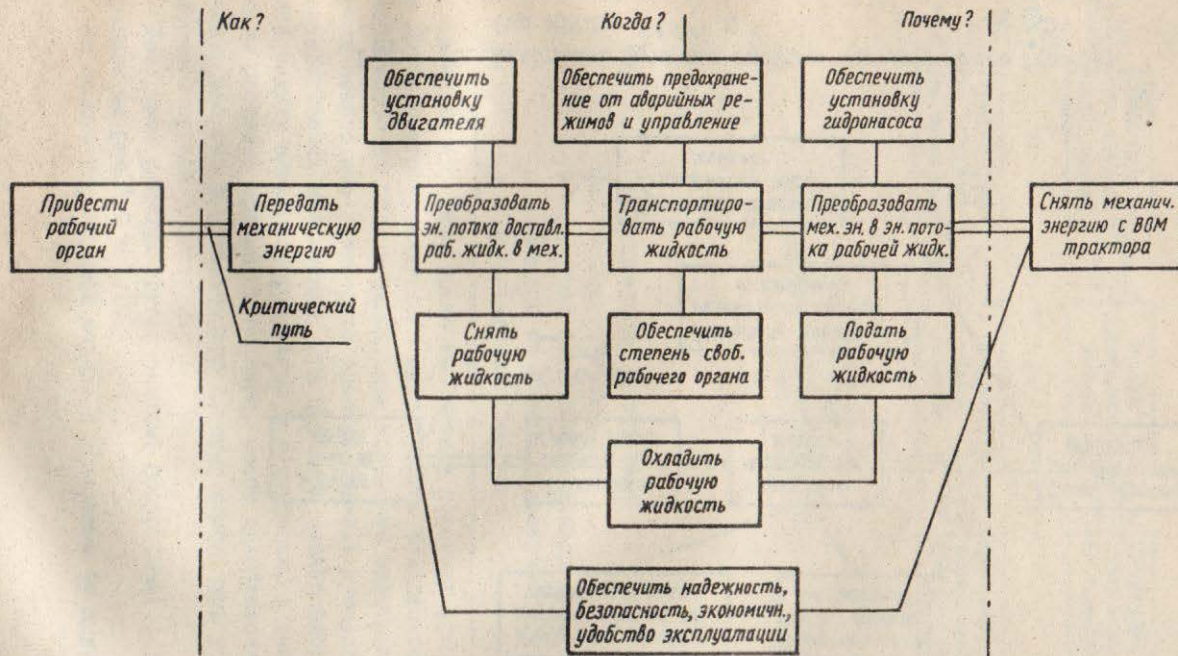


Рис. I.9. Диаграмма функции системы объемного гидропривода (по методу FAST).

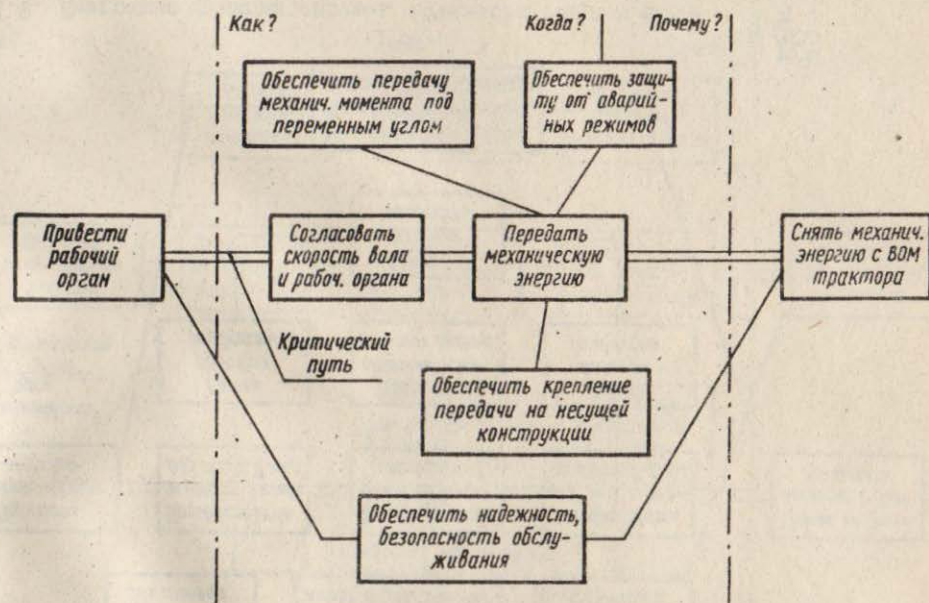


Рис. I. IO. Диаграмма функции системы механического привода (по методу *FAST*).

строим функциональную модель систем строим функциональную модель систем передачи энергии - логико-графическое изображение состава и взаимосвязей функций объекта, получаемое путем их формулировки и установления порядка подчинения.

Главными принципами формирования функциональной модели являются: соответствие выделяемой функции как частным целям данной составляющей системы, так и общим целям системы; четкая определенность специфики действий, обуславливающих содержание выделяемой функции; соблюдение строгой согласованности целей и задач, определивших выделение данной функции, с действиями, составляющими ее содержание / 46 /.

Функциональные модели систем даны на рис. I. II... I. I3. I-й уровень модели составляют главная функция системы, заключающаяся в передаче энергии к рабочим органам, и сопутствующие ей второстепенные функции - обеспечить безопасность обслуживания и обеспечить удобство обслуживания. Эти функции являются внешними. Функции, характеризующие последовательность преобразований и соответствующие принципу действия системы, определяют состав основных функций, входящих во II уровень модели. Дифференциация сложных основных (макро) функций на вспомогательные (микро) функции происходит на III и IV уровнях до тех пор, пока они могут быть описаны простейшей триадой (ввод, преобразование, вывод).

Определение функциональности и полезности материальных элементов систем, косвенную оценку исполнения функций и уровня функционально-структурной организации объектов производим по совмещенной функционально-структурной модели, построенной путем наложения функциональной модели на структурную (табл. I. 2... I. 4). В таблицах знаком "+" указывается участие какого-либо элемента в выполнении функции.

Выявление связей между элементами системы осуществляем по матрицам связей "элемент-элемент" (табл. I. 5... I. 7), в которых явные контактные (физический контакт) связи отмечены буквой "Ф", неявные корреляционные (косвенные воздействия) - "К". Внутри каждой разновидности связей выделяют вредные (-), нейтральные (\pm), полезные (+), а также прямые "П", обратные "О" и выполнение функции согласования "С".

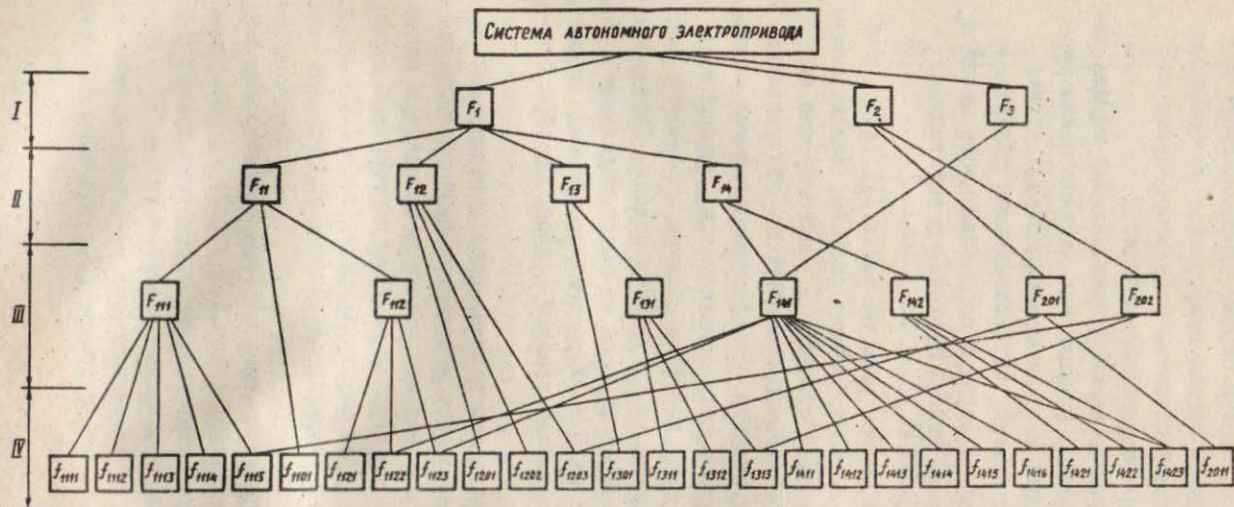


Рис. I. II. Функциональная модель системы автономного электропривода.

F_1 - обеспечить передачу механической энергии; F_2 - обеспечить безопасность обслуживания; F_3 - обеспечить удобство обслуживания; F_{11} - обеспечить преобразование механической энергии в электрическую; F_{12} - обеспечить передачу электрической энергии; F_{13} - обеспечить привод рабочего органа; F_{14} - обеспечить управление и защиту электрооборудования; F_{111} - присоединить генератор к БОМ трактора; F_{112} - обеспечить качество напряжения; F_{113} - обеспечить присоединение электродвигателя к рабочему органу; F_{121} - обеспечить дистанционное управление электроприводом; F_{122} - обеспечить защиту электрооборудования; F_{131} - обеспечить защиту от порыва электрическим током; F_{132} - обеспечить защиту от вращающихся частей; f_{1111} - передать крутящий момент от БОМ к редуктору; f_{1112} - согласовать скорость вращения БОМ и генератора; f_{1113} - установить редуктор и генератор; f_{1114} - соединить генератор с редуктором; f_{1115} - закрыть вращающиеся части; f_{1121} - преобразовать механическую энергию в электрическую; f_{1122} - обеспечить коммутационное напряжение; f_{1123} - обеспечить контроль за величиной напряжения; f_{1124} - обеспечить контроль за частотой вращения; f_{1125} - передать электрическую энергию; f_{1126} - обеспечить контроль за свободой подвижных элементов несущих конструкций и рабочего органа; f_{1127} - передать электрическую энергию; f_{1128} - обеспечить степень свободы подвижных элементов несущих конструкций и рабочего органа; f_{1129} - закрепить кабель и защитить его от механических повреждений; f_{1201} - преобразовать электрическую энергию в механическую; f_{1202} - установить электродвигатель; f_{1311} - передать крутящий момент от двигателя к рабочему органу; f_{1312} - закрыть вращающиеся части передачи; f_{1313} - обеспечить коммутацию электрических цепей; f_{1314} - обеспечить управление коммутационной аппаратурой; f_{1315} - обеспечить установку коммутационной аппаратуры; f_{1316} - обеспечить управление кнопкой управления; f_{1317} - вынести кнопки управления в кабину; f_{1318} - контролировать включение электродвигателя; f_{1319} - обеспечить защиту от короткого замыкания; f_{1321} - обеспечить защиту от перегрузок; f_{1322} - обеспечить контроль нагрузки генератора; f_{1323} - обеспечить отключение цепи при снижении сопротивления изоляции.

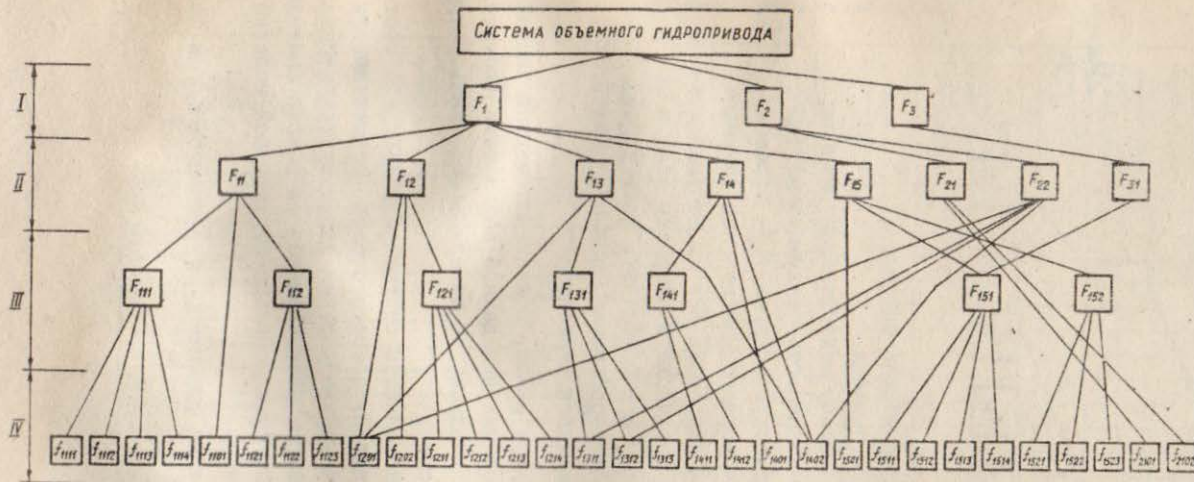


Рис. 1.12. Функциональная модель системы объемного гидропривода.

F_1 - передать механическую энергию; F_2 - обеспечить безопасность обслуживания и экологическую чистоту; F_3 - обеспечить удобство обслуживания; F_{11} - обеспечить систему рабочей жидкостью; F_{12} - обеспечить преобразование механической энергии в энергию потока жидкости; F_{13} - обеспечить транспортирование рабочей жидкости; F_{14} - обеспечить преобразование энергии потока жидкости в механическую; F_{15} - обеспечить управление и защиту от аварийных режимов; F_{21} - обеспечить защиту от вращающихся частей; F_{22} - обеспечить герметичность системы; F_{31} - обеспечить дистанционное управление системой; F_{111} - обеспечить хранение жидкости; F_{112} - обеспечить кондиционирование жидкости; F_{121} - присоединить гидронасос к ВОМ трактора; F_{131} - подать жидкость под давлением в гидронасос; F_{141} - обеспечить подключение двигателя к рабочему органу; F_{151} - обеспечить контроль за рабочими параметрами гидросистемы; F_{152} - защитить от опасных колебаний давления в системе; f_{1111} - установить бак; f_{1112} - очистить воздух, засасываемый в бак; f_{1113} - хранить рабочую жидкость; f_{1114} - уменьшить влияние окружающей среды на характеристики рабочей жидкости; f_{1115} - обеспечить систему носителем механической энергии; f_{1121} - очистить заливаемую жидкость; f_{1122} - очистить жидкость, отведенную из гидродвигателя; f_{1123} - охладить жидкость; f_{1124} - подать жидкость в насос; f_{1211} - преобразовать механическую энергию в энергию потока жидкости; f_{1212} - передать крутящий момент от ВОМ к редуктору; f_{1213} - установить редуктор и гидронасос; f_{1214} - согласовать скорость вращения ВОМ и гидронасоса; f_{1215} - соединить гидронасос с редуктором; f_{1311} - транспортировать жидкость вдоль конструкций неподвижных относительно гидролинии; f_{1312} - обеспечить степень свободы подвижных элементов конструкций и рабочего органа; f_{1313} - закрепить гидродвигатель; f_{1314} - установить гидродвигатель; f_{1315} - присоединить гидродвигатель к рабочему органу; f_{1411} - преобразовать энергию потока жидкости в механическую; f_{1412} - отвести рабочую жидкость из двигателя; f_{1511} - контролировать уровень жидкости в баке; f_{1512} - контролировать давление в системе; f_{1513} - контролировать температуру жидкости; f_{1514} - обеспечить дистанционный контроль за параметрами гидросистемы; f_{1521} - защитить систему от повышенного давления; f_{1522} - защитить гидромотор от понижения давления; f_{1523} - извлечь подчку жидкости из гидравкумулятора в гидронасос; f_{211} - закрыть вращающиеся части привода насоса; f_{212} - закрыть вращающиеся части привода рабочего органа; f_{311} - обеспечить управление гидромотором.



Рис. I. 13. Функциональная модель системы механического привода.

- F_1 – обеспечить передачу механической энергии;
 F_2 – обеспечить безопасность обслуживания; F_{11} – передать механическую энергию; F_{12} – обеспечить передачу крутящего момента под переменным углом; F_{13} – закрепить вал на несущей конструкции; F_{14} – согласовать скорость вала и рабочего органа; F_{15} – обеспечить защиту рабочего органа от перегрузок; F_{21} – обеспечить защиту от вращающихся частей.

Связи, находящиеся внутри рамок, обведенных жирной линией, являются внутренними, относящимися к данной подсистеме (комплекту), находящиеся вне рамок – внешние, характеризующие связь между элементами различных подсистем.

Функциональную организованность системы отражает его соответствие принципам актуализации, сосредоточения, совместимости и гибкости. Для оценки этой характеристики используются несколько видов коэффициентов, которые рассчитываются на основе анализа структурной, функциональной, функционально-структурной моделей, а также матрицы связей системы.

Коэффициенты актуализации функций K_{af} , элементов K_{an} и связей K_{ac} определяют как

Функционально-структурная модель системы автономного электропривода

Элементы, материальные носители	F_1						F_2		F_3
	F_{11}		F_{12}	F_{13}	F_{14}		F_{201}	F_{202}	F_{141}
	F_{111}	F_{112}	F_{131}	F_{141}	F_{142}				
Синхр. генератор		+							
Площадка генератора	+								
Карданный вал	+								
Кожух карданного вала								+	
Редуктор	+								
Муфта	+								
Кожух муфты									+
Блок компаундиров.			+						
Вольтметр			+						
Частотомер			+						
Кабель				+					
Крепеж				+					
Электродвигатель					+				
Площадка эл. двигателя					+				
Передача					+				
Кожух передачи								+	
Магнитный пускатель						+			+
Кнопки управления						+			+
Шкаф						+			+
Щиток управления						+			+
Автомат							+		
Тепловое реле							+		
Амперметр							+		+
Провод монтажный									+
Сигнальная лампа									+
ЗОУП							+		

Функционально-структурная модель системы объемного гидропривода

Элементы, материальные носители	F_1						F_2	F_3	
	F_{11}		F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}		F_{22}	F_{31}
	F_{111}	F_{112}	F_{121}	F_{131}	F_{141}	F_{151}	F_{152}	F_{21}	F_{31}
Рабочая жидкость	+								
Бак	+	+							
Площадка бака	+								
Заливной фильтр		+							
Воздушный фильтр	+								
Щуп						+			+
Термометр						+			+
Фильтр		+							
Гидронасос			+						
Площадка гидронасоса			+						
Карданный вал			+						
Кожух карданного вала							+		
Редуктор			+						
Муфта			+						
Кожух муфты							+		
Трубы				+					+
Рукава высокого давл.		+	+	+	+			+	+
Крепеж				+					
Гидромотор					+				
Площадка гидромотора					+				
Передача					+				
Кожух передачи							+		
Гидрораспределитель						+			+
Предохранит. клапан							+		
Гидроаккумулятор							+		
Обратный клапан							+		
Манометр						+			+
Щиток приборов						+			+

Таблица I.4.

Функционально-структурная модель системы
механического привода

Элементы, материальные носители	F ₁					F ₂
	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄	F ₁₅	F ₂₁
Вал	+					
Муфта		+				
Подшипник			+			
Стойка подшипника			+			
Передача				+		
Фрикционная муфта	+				+	
Кожух						+

$$K_{aF} = \frac{F_n}{F_{o\delta}}, \quad K_{aN} = \frac{N_n}{N_{o\delta}}, \quad K_{aC} = \frac{C_n}{C_{o\delta}}, \quad (I.II)(I.I2)(I.I3)$$

где F_n - необходимые (позитивные) функции; $F_{o\delta}$ - общее количество действительных функций; N_n - количество полезных (функциональных) элементов; $N_{o\delta}$ - общее количество элементов; C_n - количество полезных (функциональных) связей; $C_{o\delta}$ - общее число связей.

Коэффициенты функционального воплощения (концентрации) функций K_{KF} , элементов K_{KN} и связей K_{KC}

$$K_{KF} = \frac{F_{ocn}}{F_{o\delta}}, \quad K_{KN} = \frac{N_{ocn}}{N_{o\delta}}, \quad K_{KC} = \frac{C_{вн}}{C_{вн} + C_{вн}}, \quad (I.I4)(I.I5)(I.I6)$$

где F_{ocn} - количество основных функций; N_{ocn} - количество материальных носителей основных функций; $C_{вн}$ и $C_{вн}$ - соответственно количество внешних и внутренних связей.

Матрица связей элементов системы автономного электропривода

Элементы, материалы, носители	Синхр. генератор	Площадка генерат.	Карданный вал	Кожух кардан. вала	редуктор	Муфта	Кожух муфты	Блок компунд.	Вольтметр	Частотомер	Кабель	Крепеж	Электродвигатель	Площадка эл. двиг.	Передача	Кожух передачи	Магн. пускатель	Кнопки управления	Щиток	Щиток управления	Автомат	Тепловое реле	Амперметр	Провод монтажный	Сигнальная лампа	ЗУУП
Синхр. генератор		ДФ (+)С				ДФ (+)С		ДК (+)С	ДК (+)С	ДК (+)С	ДФ (+)С											ДК (+)		ДКС (+)		
Площадка генератора	ДФ (+)С								ДФ (+)С										ПК (+)С							
Карданный вал					ДФ (+)С																					
Кожух карданного вала			ДФ (+)																							
Редуктор		ДФ (+)С	ДФ (+)С																							
Муфта	ДФ (+)С				ДФ (+)С		ДФ (+)																			
Кожух муфты																										
Блок компундиров.	ДК (+)С	ДФ (+)С									ДФ (+)											ДФ (+)				
Вольтметр	ПК (+)С																								ДФ (+)	
Частотомер	ПК (+)С																								ДФ (+)	
Кабель	ДФ (+)							ДФ (+)														ДФ (+)				ДФ (+)
Крепеж											ДФ (+)С															
Электродвигатель	ДК (+)										ДФ (+)															ДФ (+)
Площадка эл. двигателя													ДФ (+)С	ДФ (+)С	ДФ (+)С											
Передача														ДФ (+)С	ДФ (+)С	ДФ (+)С										
Кожух передачи																										
Магнитный пускатель										ДФ (+)																
Кнопки управления																										
Щиток		ДФ (+)С																								ДФ (+)С
Щиток управления																										
Автомат									ДФ (+)	ДФ (+)																
Тепловое реле																										
Амперметр	ПК (+)																									
Провод монтажный										ДФ (+)	ДФ (+)															
Сигнальная лампа	ПК (+)С																									
ЗУУП											ДФ (+)															

Таблица I.7

Матрица связей элементов системы
механического привода

Элементы, материальные носители	Вал	Муфта	Подшипник	Стойка подшипника	Передача	Фрикционная муфта	Кожух
Вал	0Ф (+)	0Ф (+)			0ФС (+)	0ФС (+)	0Ф (+)
Муфта	ПФ (+)						0Ф (+)
Подшипник	ПФ (+)			0Ф (+)			
Стойка подшипника			ПФ (+)				
Передача	ПФ (+)					0ФС (+)	0Ф (+)
Фрикционная муфта	ПФ (+)				ПФС (+)		0Ф (+)
Кожух	ПФ (+)	ПФ (+)			ПФ (+)	ПФ (+)	

Коэффициенты совместимости по функциям K_{CF} , материальным элементам K_{CN} и связям K_{CC}

$$K_{CF} = 1 - \frac{F_c}{F_{об}}, \quad K_{CN} = 1 - \frac{N_c}{N_{об}}, \quad K_{CC} = 1 - \frac{C_c}{C_{об}}, \quad (I.17)(I.18)(I.19)$$

где F_c - число функций согласования (компенсации); N_c и C_c - соответственно количество элементов - посредников и связей, выполняющих функции согласования.

Коэффициент функциональных возможностей (широты)

$$K_{ш} = \frac{F_{осн} + F_p}{F_{осн}}, \quad (I.20)$$

где F_p - количество потенциальных функций.

Результаты расчетов по (I.II)...(I.20), средние значения коэффициентов актуализации, функционального воплощения, совместности, функциональной широты, а также значения коэффициента функциональной организованности, найденные как среднее четырех предыдущих, для рассматриваемых систем приведены в табл.

I.8. При этом величины, входящие в формулы, соответственно для систем S_{21} , S_{22} , S_r и S_m , составили при $\Phi = \Phi_{8p} - F_{п21} = F_{п22} = 26$,
 $F_{об21} = F_{об22} = 26$, $N_{п21} = N_{п22} = 26$, $N_{об21} = N_{об22} = 26$, $C_{п21} = C_{п22} = 49$,
 $C_{об21} = C_{об22} = 51$, $F_{осн21} = F_{осн22} = 4$, $N_{осн21} = N_{осн22} = 20$, $C_{вц21} = C_{вц22} = 23$,
 $C_{вн21} = C_{вн22} = 28$, $F_{с21} = F_{с22} = 10$, $N_{с21} = N_{с22} = 10$, $C_{с21} = C_{с22} = 21$,
 $F_{р21} = 2$, $F_{р22} = 1$, $F_{пг} = 30$, $F_{обг} = 30$, $N_{пг} = 28$, $N_{обг} = 28$, $C_{пг} = 46$,
 $C_{обг} = 47$, $F_{оснг} = 5$, $N_{оснг} = 25$, $C_{вцг} = 21$, $C_{внг} = 26$, $F_{сг} = 13$, $N_{сг} = 13$,
 $C_{сг} = 25$, $F_{рг} = 0$, $F_{пм} = 6$, $F_{обм} = 6$, $N_{пм} = 7$, $N_{обм} = 7$, $C_{пм} = 7$,
 $C_{обм} = 7$, $F_{оснм} = 5$, $N_{оснм} = 6$, $C_{вцм} = 10$, $C_{внм} = 0$, $F_{см} = 2$, $N_{с} = 2$,
 $C_{см} = 3$, $F_{рм} = 0$, при $\Phi = \Phi_{пост} - F_{п21} = F_{п22} = 28$, $F_{об21} = F_{об22} = 28$,
 $N_{п21} = N_{п22} = 28$, $N_{об21} = N_{об22} = 28$, $C_{п21} = C_{п22} = 50$, $C_{об21} = C_{об22} = 52$,
 $F_{осн21} = F_{осн22} = 5$, $F_{об21} = F_{об22} = 28$, $N_{осн21} = N_{осн22} = 21$, $C_{вц21} = C_{вц22} = 23$,
 $C_{вн21} = C_{вн22} = 28$, $F_{с21} = F_{с22} = 10$, $N_{с21} = N_{с22} = 10$, $C_{с21} = C_{с22} = 21$,
 $F_{р21} = 2$, $F_{р22} = 1$, $F_{пг} = 31$, $F_{обг} = 31$, $N_{пг} = 28$, $N_{обг} = 28$,
 $C_{пг} = 46$, $C_{обг} = 47$, $F_{оснг} = 6$, $N_{оснг} = 25$, $C_{вцг} = 21$, $C_{внг} = 26$, $F_{сг} = 13$,
 $N_{сг} = 13$, $C_{сг} = 25$, $F_{рг} = 0$, $F_{пм} = 7$, $F_{обм} = 7$, $N_{пм} = 8$, $N_{обм} = 8$,
 $C_{пм} = 8$, $C_{обм} = 8$, $F_{оснм} = 6$, $N_{оснм} = 7$, $C_{вцм} = 10$, $C_{внм} = 0$, $F_{см} = 3$,
 $N_{см} = 3$, $C_{см} = 4$, $F_{рм} = 0$.

Каждый из рассмотренных выше принципов и показателей отражает определенный аспект качества технических решений. Высокие значения коэффициентов актуализации систем, связаны с наличием нейтральных связей только в системе электропривода, в частности, к ним относятся связи статоров электрических машин с корпусом агрегата, создающие опасность поражения обслуживающего персонала электрическим током, хотя с другой стороны эта связь вызвана необходимостью установки электрических машин (см. табл. I.5). В других рассматриваемых системах нейтральные или вредные связи отсутствуют, также в них отсутствуют нейтральные или вредные функции и элементы.

Низкие значения коэффициентов сосредоточения систем электро- и гидропривода объясняются наличием в них большого количества вспомогательных функций, элементов и связей, обеспечиваю-

Таблица 1.8.

Коэффициенты функционально-структурного совершенства систем передачи энергии

S	Ф	Коэффициенты												функциональ- ной ши- роты	функци- ональ- ной ор- ганиз.
		актуализации				сосредоточения				совместимости					
		функ- ций	эле- мен- тов	свя- зей	сред- нее	функ- ций	эле- мен- тов	свя- зей	сред- нее	функ- ций	эле- мен- тов	свя- зей	сред- нее		
K_{aF}	K_{aM}	K_{aC}	K_a	K_{KF}	K_{KM}	K_{KC}	K_K	K_{CF}	K_{CM}	K_{CC}	K_C	$K_{ш}$	$K_{орг}$		
S_{21}	$\Phi_{вр}$	I	I	0,96	0,99	0,15	0,77	0,45	0,46	0,62	0,62	0,59	0,61	1,5	0,89
	$\Phi_{пост}$	I	I	0,96	0,99	0,17	0,75	0,44	0,46	0,61	0,61	0,58	0,60	1,4	0,86
S_{32}	$\Phi_{вр}$	I	I	0,96	0,99	0,15	0,77	0,45	0,46	0,62	0,62	0,59	0,61	1,25	0,83
	$\Phi_{пост}$	I	I	0,96	0,99	0,18	0,75	0,44	0,46	0,61	0,61	0,58	0,60	1,2	0,81
S_r	$\Phi_{вр}$	I	I	0,98	0,99	0,17	0,89	0,45	0,50	0,57	0,54	0,47	0,52	I	0,76
	$\Phi_{пост} \leq P_{нт}$	I	I	I	I	0,71	I	I	0,90	0,86	I	I	0,95	I	0,96
	$\Phi_{пост} > P_{нт}$	I	I	0,98	0,99	0,19	0,89	0,45	0,51	0,58	0,54	0,47	0,53	I	0,76
S_M	$\Phi_{вр}$	I	I	I	I	0,83	0,86	I	0,90	0,67	0,71	0,7	0,69	I	0,90
	$\Phi_{пост}$	I	I	I	I	0,86	0,88	I	0,92	0,57	0,62	0,64	0,59	I	0,88

ших выполнение основных функций, что в свою очередь вызвано природой этих систем, основанной на двукратном преобразовании энергии. Так в системе автономного электропривода по сравнению с системой механического привода дополнительно возникают одна вспомогательная и четыре основных функций, вызванных необходимостью создания удобства обслуживания (F_3), преобразования механической энергии в электрическую (F_{11}) и обратно (F_{12}), передачи энергии (F_{12}), управления и защиты электрооборудования (F_{14}), которые далее распадаются на множество вспомогательных функций (см. рис. I.11 и I.13). Соответственно система электропривода включает в себя относительно сложные подсистемы, включающие электрические машины, аппаратуру обеспечения качества напряжения, дистанционное управление, защиту оборудования и обслуживающего персонала (см. рис. I.4).

Часть основных функций системы объемного гидропривода аналогичны соответствующим функциям системы электропривода, кроме них система содержит дополнительные функции, связанные с наличием рабочей жидкости - обеспечить систему рабочей жидкостью (F_{11}) и обеспечить герметичность системы (F_{22}). Эти функции выполняются рядом дополнительных элементов, служащих для хранения, транспортирования и кондиционирования рабочей жидкости (см. рис. I.12). Как следствие в обеих системах возникает большое количество внутренних и внешних связей подсистем (см. табл. I.5 и I.6).

Достаточно низкий коэффициент совместимости систем свидетельствует о наличии в них значительного числа элементов посредников, например, между ВОМ трактора и электро- или гидромашиной встроены карданный вал, редуктор и муфта. Наличие таких элементов и связей согласования ухудшает качество функционирования системы.

Высокое значение коэффициента функциональной широты системы электропривода промышленной частоты S_{31} обеспечивается возможностью использования его генератора в составе МЭС: 1) в качестве передвижной резервной электростанции, при перерывах электроснабжения; 2) для электроснабжения электрифицированной малогабаритной техники и ручного инструмента в полевых условиях. Генератор системы электропривода повышенной частоты S_{32} само-

стоятельно не может быть использован в качестве резервного источника для электродвигательной нагрузки. Область использования системы гидропривода S_T и механической S_M и их элементов ограничивается их прямым функциональным назначением. Более низкие значения коэффициентов для систем, приводящих рабочий орган с $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$, объясняется введением в них, кроме системы гидропривода, устройства преобразующего вращательное движение в возвратно-поступательное (винтового механизма). В системе гидропривода для этих целей используется гидроцилиндр, который при $P \leq P_{NT}$, где P_{NT} — мощность гидронасоса трактора, может быть подключен непосредственно к гидросистеме трактора, что существенно упрощает автономную систему передачи энергии и следовательно повышает ее функциональную организованность/31,32,34,35/.

В целом вышеприведенные рисунки, таблицы и расчеты показывают высокое функционально-структурное совершенство системы механического привода, за исключением гибкости, и весьма высокую функциональную организованность системы гидропривода при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ и $P \leq P_{NT}$.

Зная коэффициент функциональной организованности системы $K_{\text{орг}}$, скорректированный показатель эффективности систем K'_3 находим как

$$K'_3 = \frac{K_3}{K_{\text{орг}}} \quad (I.2I)$$

I.3.3. Характеристика задачи синтеза структуры системы и результаты синтеза

В соответствии с исходными данными, структура автономной системы передачи энергии может принимать лишь конечное число дискретных значений, т.е. имеет место ограничение типа дискретности на множество строго допустимых систем $M_{\text{сд}}$ удовлетворяющих совокупности исходных данных и ограничений, поэтому множество оказывается несвязным и будет представлять собой совокупность конечного числа изолированных точек. Следовательно, имеет место предельный случай синтеза структуры автономной системы передачи энергии — дискретный выбор структуры системы для различных условий $Y_u = \{\Phi, P, \ell, n\}$.

Тогда задачу глобального синтеза сформулируем следующим образом: из дискретного конечного множества точек, образованных из совокупности строго допустимых систем $M_{сд}$, удовлетворяющих исходным требованиям $\{Y, D_S, CK\}$, выбрать такую систему S , которая обладает наилучшим значением вектора K . При этом критерием предпочтения (оптимальности) искомой системы $S \in M_{сд}$ будет

$$\left. \begin{aligned} K'_2 &= (C_{g1} p'(t) + C_{g2} \varphi' + C_{g3} m'_p) K_{опз} = \min, \\ C &= \min, \end{aligned} \right\} \quad (I.22)$$

т.е. синтез проводим по критерию "эффективность стоимость". В (I.22) для удобства сравнения, нормированные показатели эффективности приведены к стандартному виду - чем меньше величина, тем лучше система при прочих равных условиях.

$$p'(t) = \frac{1-p(t)}{p_S(t)}, \quad \varphi' = \frac{1-\varphi}{\varphi_S}, \quad m'_p = \frac{m_p}{m_S}, \quad (I.23)(I.24)(I.25)$$

где $p_S(t) = 1$, $\varphi_S = 1$, $m'_p = 10^3$ кг - базисные значения вероятности безотказной работы, к.п.д. и массы системы. Тогда эффективность системы строго монотонна и повышается с уменьшением каждого из показателей.

Анализ показал, что при ряде условий использования систем $Y_u = \{\phi, p, \ell, n\}$ множество нехудших систем вырожденное и состоит всего из одной системы, например S_1 , тогда система S_1 безусловно лучше остальных систем S_2, \dots, S_n , т.е. имеет место безусловный критерий предпочтения и худшие системы могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения без ущерба для результатов синтеза.

В других случаях вектора совокупности $K(S)$ оказываются не сравнимыми и использование безусловного критерия предпочтения позволяет определить только нехудшие системы. Тогда для доведения задачи синтеза до конца вводим условный критерий предпочтения - показатель интегрального качества K_{Σ} , являющийся функцией эффективности и стоимости

$$K_{\Sigma} = K'_2 \cdot C = \min. \quad (I.23)$$

Введение такого критерия вполне допустимо при строгой монотонности функции эффективности с уменьшением каждого из определяющих его показателей K_1, \dots, K_m , при фиксированных значениях всех остальных и строгой монотонности изменения стоимости для различных условий эксплуатации.

Сказанное проиллюстрируем на примере рис. I.14, где точки, соответствующие K'_2 и C для двух систем S_1 и S_2 , связаны по постоянному передачу энергии ℓ при $P = \text{const}$. В отрезке $\ell \leq \ell_1$ безусловным предпочтением обладает система S_1 , поскольку оба показателя этой системы лучше соответствующих показателей S_2 . По этой же причине при $\ell > \ell_2$ оптимальной является система S_2 . В отрезке $\ell_1 < \ell < \ell_2$ обе системы являются нехудшими, т.е. $K'_{22}(\ell)$ системы S_2 лучше, чем $K'_{21}(\ell)$, но $C_1(\ell)$ системы S_1 лучше $C_2(\ell)$. Очевидно, в последнем случае необходимо прибегнуть к условному критерию предпочтения (I.23), который и позволяет найти окончательную границу использования систем - при $\ell \leq \ell_3$ лучшей является система S_1 , при $\ell > \ell_3$ система S_2 .

Поскольку инженерные расчеты проводятся с точностью $\pm 5\%$, возникает необходимость оценки устойчивости границ между зонами /78/. Пусть в пределах допустимой погрешности функция $K_{21}(\ell)$ лежит в зоне ограниченной кривыми $K_{21}(\ell)_{\max}$ и $K_{21}(\ell)_{\min}$, аналогично $K_{22}(\ell)$ в пределах между $K_{22}(\ell)_{\max}$ и $K_{22}(\ell)_{\min}$. Тогда граница зон систем S_1 и S_2 должна быть рассмотрена для наименее благоприятного сочетания погрешностей определения K_{21} и K_{22} . В частности, путем сравнения $K_{21}(\ell)_{\max}$ и $K_{22}(\ell)_{\min}$, а также $K_{21}(\ell)_{\min}$ и $K_{22}(\ell)_{\max}$, другими словами, при наихудшем возможном значении K_{21} и наилучшем возможном K_{22} и наоборот. На рис. I.14 видно, что в первом случае граница смещается влево до $\ell_{3\min}$, расширяя зону оптимальности S_2 , во втором - вправо до $\ell_{3\max}$, сужая зону S_2 .

Для проведения синтеза необходимо располагать совокупностью условий эксплуатации. Однако в действительности не все эти данные известны априори, т.е. являются неслучайными фиксированными параметрами и показателями, известными с определенной точностью, например, мощность, потребляемая рабочим органом является стохастической функцией с известным законом распределения, климатические условия, запыленность, влажность, уровень вибра-

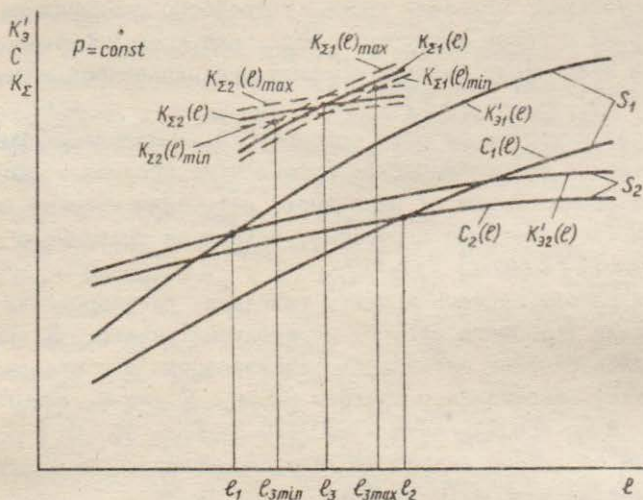


Рис. 1.14. К определению границ использования систем,

ции - неопределенными величинами, для которых известны только область возможных значений.

В связи с этим, синтез системы передачи энергии проводим на основе принципов стохастического детерминизма, который состоит в том, что случайную функцию заменяем их математическими ожиданиями / 23, 45 /.

Неопределенности в процессе синтеза учитываем путем решения минимаксной задачи, когда отыскиваются наименее благоприятные условия работы системы и оптимальная при таких неблагоприятных условиях система / 19, 23 /.

При синтезе системы рассматривались два наиболее распространенных случая функционального назначения приводимого рабочего органа по роду движения, когда он совершает вращательное движение $\Phi = \Phi_{\nu p}$ (дисковая пила, приводной вал транспортера, кривошип режущего аппарата косилки и другие), и возвратно-поступа-

тельное движение $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ (вилы погрузчиков тюков, механизм подъема и опускания мотовила жатки, устройство раздвижения и подъема рабочих органов контурного обрезчика крон деревьев и другие), при этом число рабочих органов ограничивалось восьмью - $O_{S\Phi} = \{ \Phi = \Phi_{\text{вр}}, \Phi_{\text{пост}}; n = 8 \}$.

Потребная мощность рабочих органов СХМ, выполняющих наиболее энергоемкие технологические процессы не превышает 150 кВт, дальность их расположения от первичного источника энергии достигает 400 м (дождевальные агрегаты), исходя из сказанного $O_{S\rho} = \{ \rho \leq 150 \text{ кВт}; \ell \leq 400 \text{ м} \} / 57, 70 /$.

Условия работы системы приняты тяжелыми, регулирование скорости двигателя (рабочего органа) не предусматривалось $O_{S\omega} = \{ \omega = \text{const} \}$, анализировались системы автономного электропривода с стандартными величинами напряжения и частоты - S_{31} при $O_{S\Omega 31} = \{ U_N = 380/220 \text{ В}; f_N = 50 \text{ Гц} \}$ и S_{32} при $O_{S\Omega 32} = \{ U_N = 220/127 \text{ В}; f_N = 400 \text{ Гц} \}$, а также система объемного гидропривода с ограничением на номинальное давление $O_{Sg} = \{ p_N = 10; 14 \text{ МПа} \}$.

Эффективность и стоимость каждой из систем запишем как

$$\left. \begin{aligned} K_{31} &= C_{81} p'_{31}(t) + C_{82} \varrho'_{31} + C_{83} m'_{p31}; \\ K_{32} &= C_{81} p'_{32}(t) + C_{82} \varrho'_{32} + C_{83} m'_{p32}; \\ K_{3r} &= C_{81} p'_r(t) + C_{82} \varrho'_r + C_{83} m'_{pr}; \\ K_{3M} &= C_{81} p'_M(t) + C_{82} \varrho'_M + C_{83} m'_{pM}; \end{aligned} \right\} \quad (I.24)$$

$$C_{31} = \varphi_1(\Phi, \rho, \ell, n); C_{32} = \varphi_2(\Phi, \rho, \ell, n); C_r = \varphi_3(\Phi, \rho, \ell, n); C_M = \varphi_4(\Phi, \rho, \ell, n).$$

Зависимости $p'_i(t), \varrho'_i, m'_i, C = \varphi(\Phi, \rho, \ell, n)$, входящие в (I.24), вывести аналитически с достаточной точностью не удастся, поэтому они были получены в виде графиков, путем расчета каждого из систем передачи энергии для нескольких значений ρ, ℓ и n в пределах заданного диапазона. При этом стоимость C рассчитывалась по известной методике / 72 /.

Показатели системы механического привода по возможности корректировались путем анализа приводов рабочих органов существующих СХМ с различными потребляемыми мощностями и расстояниями передачи энергии. Примеры расчетов систем приведены в приложении I.

Ниже приведены результаты аппроксимации полученных графиков показателей качества систем S_{31}, S_{32}, S_r, S_M .

Вероятность безотказной работы систем

$$P'_{31}(t) = P'_{32}(t) = 1 - P_g(t) P_g^n(t) \prod_{i=1}^n P_{K_i}(t); \quad (I.25)$$

$$P'_r(t) = 1 - P_{2H}(t) P_{2M}^n(t) \prod_{i=1}^n P_{2L_i}(t); \quad (I.26)$$

$$P'_M(t) = 1 - P_M(t), \quad (I.27)$$

где $P_g(t) = 0,730$ - вероятность безотказной работы синхронного генератора; $P_g(t) = 0,986$ при $\Phi = \Phi_{\theta p}$ и $P_g(t) = 0,983$ при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ - то же асинхронного двигателя; $P_{K_i}(t) = 0,9998$ - I м силового кабеля; $P_{2H}(t) = 0,924$ - гидронасоса; $P_{2M}(t) = 0,992$ при $\Phi = \Phi_{\theta p}$ и $P_{2M}(t) = 0,982$ при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ - гидромотора; $P_{2L_i}(t) = 0,9998$ - I м гидролинии; $P_M(t) = (a_1 + a_2 P)^{\ell}$ при $\Phi = \Phi_{\theta p}$ и $P_M(t) = (a_3 + a_2 P)^{\ell}$ при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ - системы механической передачи; P - суммарная потребляемая мощность рабочих органов; ℓ - среднее расстояние от ВОМ трактора до рабочих органов; n - число рабочих органов; ℓ_i - расстояние от ВОМ до i -го рабочего органа; $a_1 = 0,978$, $a_2 = 0,54 \cdot 10^{-4}$, $a_3 = 0,977$ - постоянные коэффициенты.

К.п.д. каждой системы

$$\eta'_{31} = 1 - \frac{1}{n^2} \eta_{P1} \eta_2 \eta_B \sum_{i=1}^n \eta_{gi} \sum_{i=1}^n \eta_{Ki}; \quad (I.28)$$

$$\eta'_{32} = 1 - \frac{1}{n^2} \eta_{P2} \eta_2 \eta_B \sum_{i=1}^n \eta_{gi} \sum_{i=1}^n \eta_{Ki}; \quad (I.29)$$

$$\eta'_r = 1 - \frac{1}{n^2} \eta_{P1} \eta_{2H} \sum_{i=1}^n \eta_{rMi} \sum_{i=1}^n \eta_{Li}; \quad (I.30)$$

$$\eta'_M = 1 - a_{15}^{\ell} \eta_B, \quad (I.31)$$

где $\eta_{P1} = 0,95$ - к.п.д. редуктора; $\eta_r = a_4 + a_5 P^{\delta_1}$ при $P \leq 75$ кВт и $\eta_2 = 0,71$ при $P > 75$ кВт - то же генератора; $\eta_B = 1$ при $\Phi = \Phi_{\theta p}$ и $\eta_B = 0,85$ при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ - винтового механизма; $\eta_{gi} = a_6 + a_7 P_i^{\delta_2}$ при $P_i \leq 22$ кВт и $\eta_{gi} = 0,90$ при $P_i > 22$ кВт - i -го электродвигателя; $\eta_{Ki} = 1 - a_8 \ell_i$ - кабельной линии i -го электродвигателя,

$\varrho_{p2} = 0,82$ - редуктора системы электропривода повышенной частоты; $\varrho_{2H} = a_9 + a_{10} p^{\beta_3}$ при $p \leq 35$ кВт и $\varrho_{2H} = 0,83$ при $p > 35$ кВт-гидронасоса; $\varrho_{2Mi} = a_{11} + a_{12} p_i^{\beta_4}$ при $p_i \leq 35$ кВт и $\Phi = \Phi_{8p}$, $\varrho_{2Mi} = 0,77$ при $p_i > 35$ кВт и $\Phi = \Phi_{8p}$, $\varrho_{2Mi} = 0,95$ при $\Phi = \Phi_{пост}$ - i -го гидромотора; $\varrho_{li} = a_{13} + a_{14} l_i$ - гидролинии i -го гидромотора; P_i - мощность потребляемая i -м рабочим органом; $a_4 = 0,75$, $a_5 = 43,81 \cdot 10^{-3}$, $\beta_1 = 0,3$, $a_5 = 0,80$, $a_7 = 11,49 \cdot 10^{-3}$, $\beta_2 = 0,7$, $a_8 = 0,125 \cdot 10^{-3}$, $a_9 = 0,71$, $a_{10} = 0,041$, $\beta_3 = 0,3$, $a_{11} = 0,65$, $a_{12} = 0,041$, $\beta_4 = 0,3$, $a_{13} = 0,93$, $a_{14} = -0,525 \cdot 10^{-3}$, $a_{15} = 0,958$ - постоянные коэффициенты.

Рабочая масса

$$m'_{21} = (m_{21} + m_{g1} + m_{K1}) \cdot 10^{-3} = a_{16} p^{\beta_4} + a_{17} \sum_{i=1}^n P_i^{\beta_5} + a_{18} \sum_{i=1}^n P_i l_i ; \quad (I.32)$$

$$m'_{22} = (m_{22} + m_{g2} + m_{K2}) \cdot 10^{-3} = a_{19} p^{\beta_6} + a_{20} \sum_{i=1}^n P_i^{\beta_7} + a_{21} \sum_{i=1}^n P_i l_i ; \quad (I.33)$$

$$\begin{aligned} \text{при } \Phi = \Phi_{8p} \quad m'_r &= (m_{2H1} + m_{2M} + m_{2H} + m_{2C} + m_{2D} + m_{2N} + m_{2C}) \cdot 10^{-3} = \\ &= a_{22} p^{\beta_8} + a_{23} \sum_{i=1}^n P_i^{\beta_9} + a_{24} \sum_{i=1}^n P_i^{\beta_{10}} l_i + a_{25} \sum_{i=1}^n P_i^{\beta_{11}} l_i + \\ &+ a_{26} p^{\beta_{12}} + a_{27} \sum_{i=1}^n P_i^{\beta_{13}} l_i + a_{28} \sum_{i=1}^n P_i^{\beta_{14}} l_i ; \quad (I.34) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{при } \Phi = \Phi_{пост} \quad m'_r &= (m_{2H2} + m_{2C} + m_{2N} + m_{2C}) \cdot 10^{-3} = \\ &= a_r a_{29} p^{\beta_{15}} + a_{30} \sum_{i=1}^n P_i l_i + \\ &+ a_{31} \sum_{i=1}^n P_i^{\beta_{16}} l_i + a_{32} \sum_{i=1}^n P_i^{\beta_{17}} l_i , \quad (I.35) \end{aligned}$$

$$m_M^i = a_{33} + a_{34} \rho^{b_{18}} \ell + a_M (a_{35} n + 2 \cdot 10^{-3} \sum_{i=1}^n \rho_i^{b_{18}}), \quad (I.36)$$

где m_{21}, m_{g1}, m_{K1} - масса генератора, двигателя и кабеля системы электропривода промышленной частоты; m_{22}, m_{g2}, m_{K2} - масса генератора, двигателя и кабеля системы электропривода повышенной частоты; $m_{2H1}, m_{2M}, m_{1H}, m_{1C}, m_{1B}, m_{1N}, m_{1C}$ - масса гидронасоса, гидромотора, напорной линии, сливной линии, масла в баке, масла в напорной и сливной гидролиниях при $\Phi = \Phi_{\text{вп}}$; $m_{2H2}, m_{1C}, m_{1H}, m_M$ - масса гидронасоса, гидроцилиндра, гидролинии и масла при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$; $a_{46} = 76,6 \cdot 10^{-3}$, $b_{14} = 0,6$, $a_{17} = 11,9$ и $b_{15} = 1$ при $P_i \leq 10$ кВт и $\Phi = \Phi_{\text{вп}}$, $a_{17} = 27,8$ и $b_{15} = 0,7$ при $P_i > 10$ кВт и $\Phi = \Phi_{\text{вп}}$, $a_{17} = 34,2$ и $b_{15} = 0,7$ при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$, $a_{18} = 64,14 \cdot 10^{-6}$, $a_{19} = 14,2 \cdot 10^{-3}$, $b_{16} = 0,6$, $a_{20} = 5,6 \cdot 10^{-3}$ при $\Phi = \Phi_{\text{вп}}$ и $a_{20} = 106 \cdot 10^{-3}$ при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$, $a_{21} = 0,111 \cdot 10^{-3}$, $a_{22} = 26,14 \cdot 10^{-3}$, $b_{18} = 0,6$, $a_{23} = 3,83 \cdot 10^{-3}$, $b_{19} = 0,6$, $a_{24} = 0,14 \cdot 10^{-3}$, $b_{10} = 0,7$, $a_{25} = 0,24 \cdot 10^{-3}$, $b_{11} = 0,3$, $a_{26} = 30,7 \cdot 10^{-3}$, $b_{12} = 0,8$, $a_{27} = 0,072 \cdot 10^{-3}$, $b_{13} = 0,7$, $a_{28} = 0,14 \cdot 10^{-3}$, $b_{14} = 0,7$, $a_{29} = 17,3 \cdot 10^{-3}$, $b_{15} = 0,7$, $a_{30} = 12,99 \cdot 10^{-3}$, $a_{31} = 0,31 \cdot 10^{-3}$, $b_{16} = 0,6$, $a_{32} = 0,49 \cdot 10^{-3}$, $b_{17} = 0,7$, $a_{33} = 20,3 \cdot 10^{-3}$, $a_{34} = 4,50 \cdot 10^{-3}$, $b_{18} = 0,7$, $a_{35} = 20 \cdot 10^{-3}$, $b_{19} = 0,7$ - постоянные коэффициенты; $a_r = 0$ при $P \leq P_{HT}$ и $a_r = 1$ при $P > P_{HT}$; $a_M = 0$ при $\Phi = \Phi_{\text{вп}}$ и $a_M = 1$ при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ - коэффициенты; $P_{HT} = 2,2$ кВт - мощность гидронасоса трактора Т-25; $P_{HT} = 7,0$ кВт - то же трактора Т-40 и ДТ-75; $P_{HT} = 12,3$ кВт - трактора МТЗ-80; $P_{HT} = 19,0$ кВт - трактора Т-150; $P_{HT} = 25,2$ кВт - трактора К-700.

Показатель стоимости

$$\begin{aligned} C_{g1} &= C_{g1} + C_{gK1} = \\ &= a_{36} \rho^{b_{20}} + a_{37} \sum_{i=1}^n \rho_i^{b_{21}} + a_{38} \sum_{i=1}^n \rho_i^{b_{22}} \ell_i + a_{39} \sum_{i=1}^n \rho_i^{b_{23}} \ell_i; \quad (I.37) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{g2} &= C_{g2} + C_{gK2} = \\ &= a_{40} \rho^{b_{24}} + a_{41} \sum_{i=1}^n \rho^{b_{25}} + a_{42} \sum_{i=1}^n \rho_i^{b_{26}} \ell_i + a_{43} \sum_{i=1}^n \rho_i^{b_{27}} \ell_i; \quad (I.38) \end{aligned}$$

$$C_r = C_H + C_{MЛ} =$$

$$= a_r a_{44} P^{b_{28}} + a_{45} \sum_{i=1}^n P_i^{b_{29}} + a_{46} \sum_{i=1}^n P_i^{b_{30}} \ell_i + a_{47} \sum_{i=1}^n P_i + a_{48} \sum_{i=1}^n P_i \ell_i; \quad (I.39)$$

$$C_M = a_{49} + a_{50} P + a_{51} P^{b_{31}} \ell, \quad (I.40)$$

где C_{21}, C_{2K1} - стоимость комплекса генератора и остальной части системы электропривода промышленной частоты; C_{22}, C_{2K2} - то же системы электропривода повышенной частоты; $C_H, C_{MЛ}$ - стоимость комплекса гидронасоса и остальной части системы гидропривода: $a_{36} = 57,7 \cdot 10^3$, $b_{20} = 0,2$, $b_{21} = 0,4$, $b_{22} = 0,35$, $b_{23} = 0,4$, $a_{40} = 48,5 \cdot 10^3$, $b_{24} = 0,1$, $a_{44} = 48,12 \cdot 10^3$, $b_{28} = 0,2$, $a_{51} = 27,35$, $b_{31} = 0,5$ - постоянные коэффициенты; $a_{37} = 16,2 \cdot 10^3$, $a_{38} = 259,1$, $a_{39} = -161,2$, $a_{41} = 13,1 \cdot 10^{-3}$, $b_{25} = 0,3$, $a_{42} = 233,8$, $b_{26} = 0,35$, $a_{43} = -132,7$, $b_{27} = 0,3$, $a_{45} = 11,2 \cdot 10^{-3}$, $b_{29} = 0,2$, $a_{46} = 783,6$, $b_{30} = 0,2$, $a_{47} = 1,6 \cdot 10^{-3}$, $a_{48} = 9,5$, $a_{49} = 15,8 \cdot 10^3$, $a_{50} = 0$ при $\Phi = \Phi_{6P}$ и $a_{37} = 26,7 \cdot 10^3$, $a_{38} = 385,5$, $a_{39} = -268,6$, $a_{41} = 22,1 \cdot 10^3$, $b_{25} = 0,35$, $a_{42} = 344,4$, $b_{26} = 0,35$, $a_{43} = -221,2$, $b_{27} = 0,35$, $a_{45} = 11,4 \cdot 10^{-3}$, $b_{29} = 0,3$, $a_{46} = 559,3$, $b_{30} = 0,3$, $a_{47} = 199,1$, $a_{48} = 8,5$, $a_{49} = 63,2 \cdot 10^3$, $a_{50} = 2,3 \cdot 10^3$ при $\Phi = \Phi_{пост}$ - коэффициенты.

Для синтеза структуры системы по эксплуатационным свойствам и отдельным единичным показателям, в соответствии с (I.22) ... (I.40), были разработаны алгоритм и программа расчета на ЭВМ (приложение 2). Программа позволяет отыскать оптимальную структуру построения автономных систем передачи энергии в зависимости от функционального назначения рабочего органа, величины передаваемой к рабочему органу мощности и расстояния передачи для СХМ, имеющих до восьми различных рабочих органов, а также найти зоны оптимального использования различных систем в пределах принятых ограничений.

Результаты синтеза по критерию (I.22) "эффективность - стоимость" при $n = 1,3,8$ приведены на рис. I.15 и I.16. Здесь

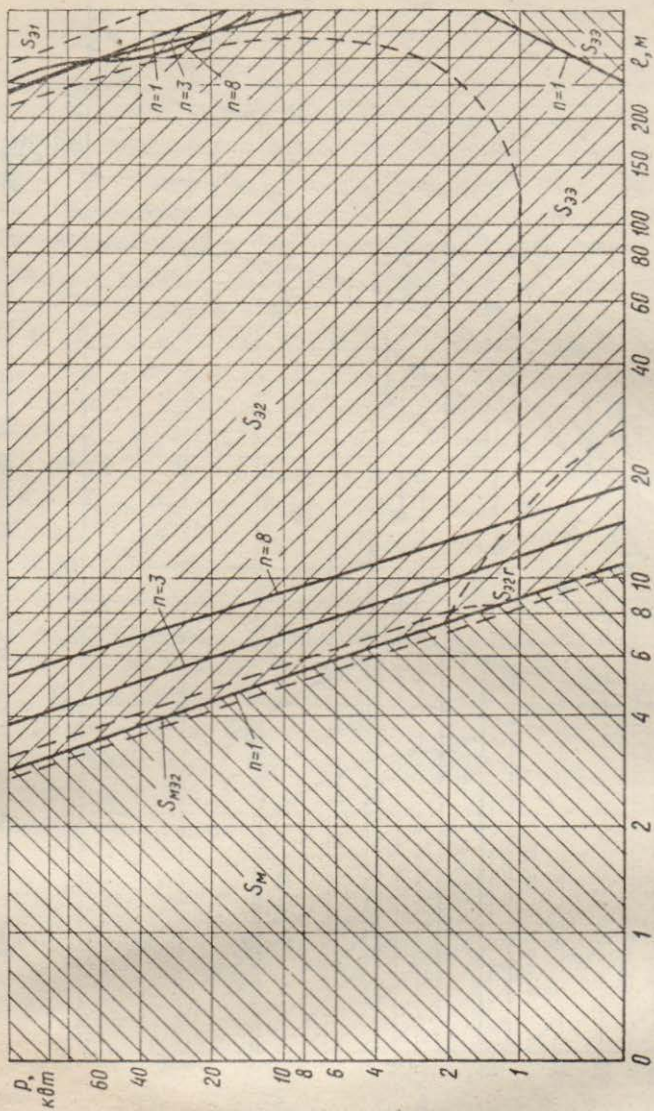


Рис. 1.15. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии при $\Phi = \Phi_{\text{гр}}$.

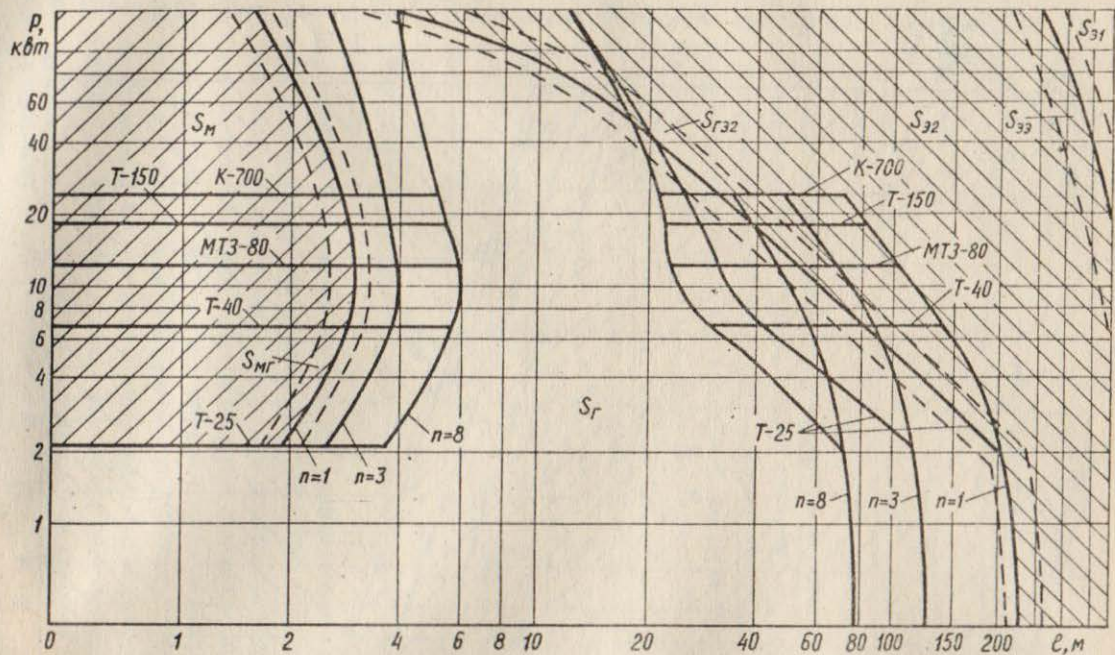


Рис. I.16. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$.

принято, что при $n = 3$ и 8 , все рабочие органы имеют одинаковую требуемую мощность и удалены на равные расстояния от ВОМ трактора. Из рис. I.15 видно, при $n = I$ и $\Phi = \Phi_{\text{вр}}$, если рабочий орган вынесен на расстояние до $\ell = 2,8 \dots II$ м от первичного источника энергии, наилучшим является механический привод S_M , на больших расстояниях целесообразно использование системы электропривода повышенной частоты S_{32} и только на значительных расстояниях $\ell > 230 \dots 400$ м оптимальным будет электропривод промышленной частоты. С увеличением числа рабочих органов зона использования S_M расширяется, достигая при $n = 8$, дальности $\ell = 5,2 \dots I7$ м, также несколько расширяется зона использования S_{31} . Гидропривод в данном случае является худшей по сравнению с другими системами. Пределы устойчивости границ зон при $n = I$ показаны пунктирными линиями, например, зона устойчива левее пунктирной линии, находящейся слева от сплошной линии, ограничивающей S_M и S_{32} . В случае, когда условия использования системы передачи энергии расположены в зоне $S_{\text{нрз}}$, ограниченной пунктирными линиями, возможно применение обеих систем S_M и S_{32} , в зоне S_{32r} - систем S_{32} и S_r и, наконец, в зоне S_{33} - систем S_{32} и S_{31} . Как видим, граница между зонами S_M и S_{32} обладает достаточно большой устойчивостью и найдена с точностью $\pm 0,3 \dots 0,8$ м, граница между системами S_{32} и S_{31} значительно менее устойчива и при $P \leq I$ кВт возможно использование обеих систем на расстоянии ℓ от $9 \dots II$ м до 400 м, что объясняется близкими значениями показателей эффективности этих систем в указанных пределах. Устойчивость границ с увеличением n практически не изменяется, поэтому пределы устойчивости границ для $n > I$ на графиках не указаны.

Отметим, что зоны с возможным использованием двух или трех систем приводов здесь и далее отмечены буквой S с соответствующими, ранее принятыми, значками систем.

При поступательном движении рабочего органа $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ (см. рис. I.16), $n = I$, агрегатировании электрифицированной СХМ трактором Т-25 с мощностью встроенного гидронасоса $P_{\text{HT}} = 2,2$ кВт и $P \leq P_{\text{HT}}$ на расстоянии до $\ell = 200 \dots 220$ м оптимальной является система гидропривода S_r . При $P > P_{\text{HT}}$ на расстоянии до $\ell = I,6 \dots \dots 3$ м оптимальной становится система механического привода S_M .

Зона использования системы электропривода повышенной частоты S_{32} постепенно расширяется с $\ell = 220 \dots 400$ при $P = 1$ кВт до $\ell = 4 \dots 400$ м при $P = 150$ кВт. Использование системы S_{31} целесообразно, только при мощностях $P > 20$ кВт и расстоянии $\ell > 250$ м. При агрегатировании СХМ другими, более энергонасыщенными тракторами зона использования системы S_r расширяется, поскольку растет мощность гидросистемы, которую можно подключить к гидронасосу трактора. Соответствующие границы зон для различных сельскохозяйственных тракторов показаны горизонтальными линиями. При $P_{нт} > 2,2$ кВт граница между S_r и S_{32} проходит по правой ветви кривой, показанной на графике. С ростом n зоны S_M и S_{32} расширяются.

Многие экспериментальные машины разработаны с наиболее распространенным на практике электроприводом промышленной частоты, поэтому большой интерес представляет синтез структуры без учета системы электропривода повышенной частоты. Результаты такого синтеза приведены на рис. I.17 и I.18.

При $\Phi = \Phi_{\delta p}$ и $n = 1$ (см. рис. I.17) на расстоянии до $\ell = 7 \dots 12$ м в зависимости от мощности оптимальной является система S_M . Систему гидропривода S_r целесообразно использовать при $P \leq 34$ кВт и дальности передачи энергии от $\ell = 7$ до $\ell = 17$ м. В остальных случаях оптимальной является система электропривода S_{31} . С ростом n зона оптимальности S_r сужается и при $n = 8$ полностью вырождается. Граница между S_r и S_{31} достаточно сильно размыта и может быть сдвинута от основной линии на +9 м. Следовательно, существует большая вероятность нахождения условий использования систем в зоне неустойчивой границы, в этом случае оптимальную систему целесообразно уточнить по дополнительным условиям, например, по одной из актуальных в рассматриваемом варианте частных показателей качества.

В случае $\Phi = \Phi_{\text{нст}}$ и $n = 1$ (см. рис. I.18) зона оптимальности системы механического привода S_M остается такой же как на рис. I.16. Зоны использования систем S_r и S_{31} существенно расширяются за счет зоны системы электропривода повышенной частоты

Таким образом, оптимальная структура построения исследуемой системы передачи энергии в основном зависит от расстояния ^{передачи} энергии, передаваемой мощности, функционального назначения ра-

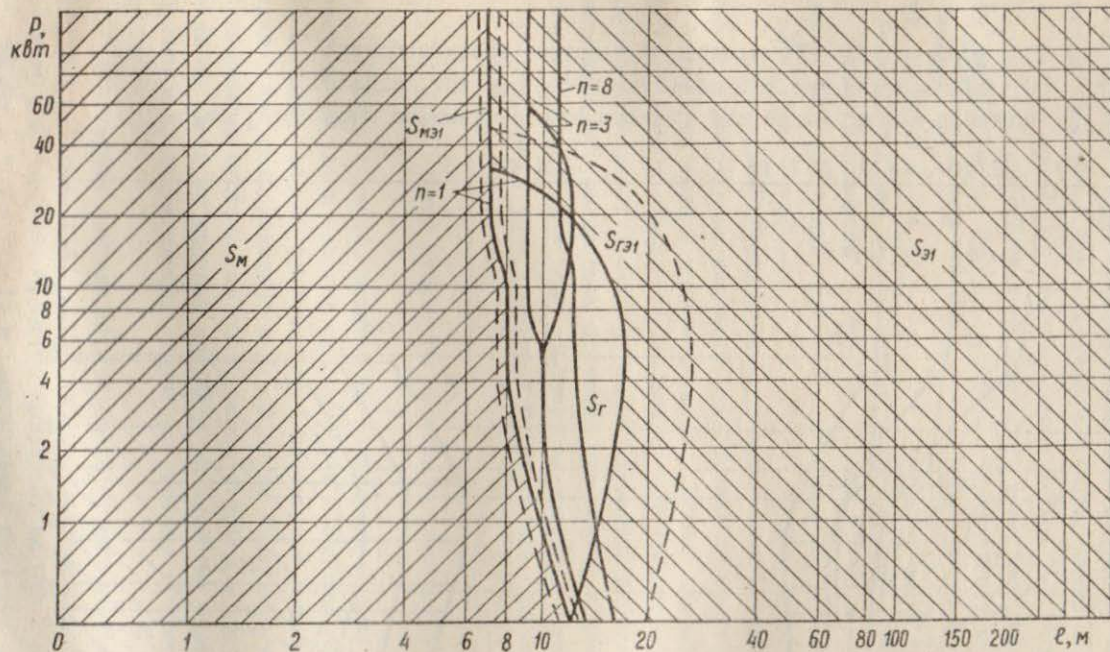


Рис. I.17. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии при $\Phi = \Phi_{8p}$ без учета системы автономного электропривода повышенной частоты $S_{Э2}$.

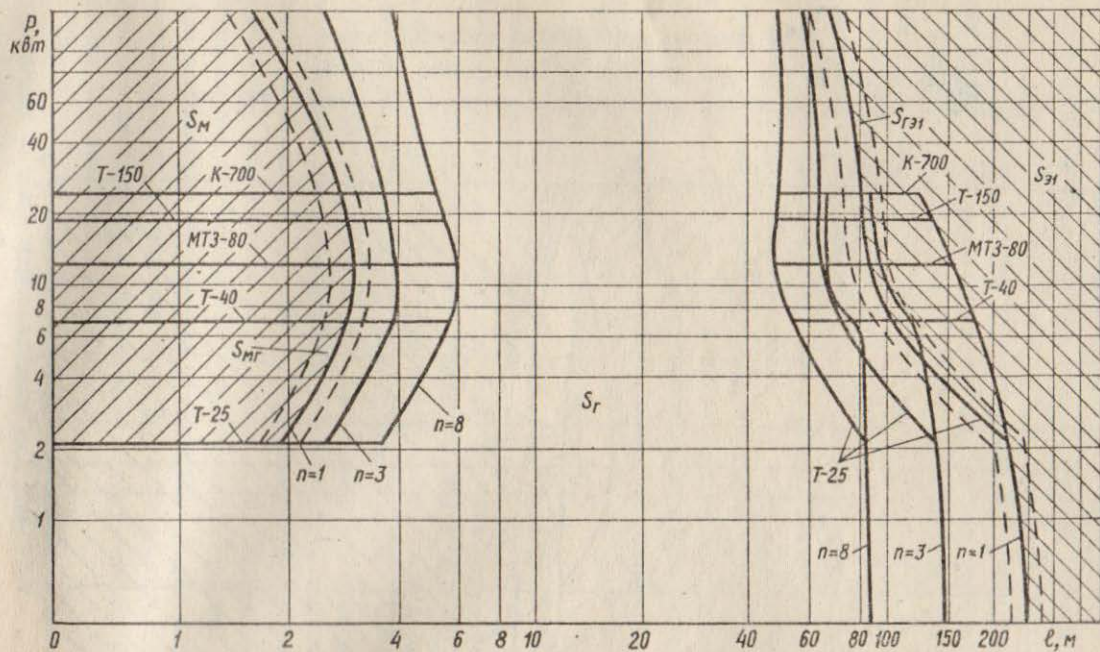


Рис. I. 18. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ без учета системы автономного электропривода повышенной частоты S_{32} .

бочего органа по роду движения и в меньшей степени от числа рабочих органов. Существенное влияние на структуру построения системы оказывает тип трактора, агрегирующего СХМ, энергонасыщенные тракторы, например, типа К-700, Т-150, оснащенные гидронасосами значительной мощности, расширяют зону использования гидропривода. При одном рабочем органе система автономного электропривода при $\Phi = \Phi_{\text{вр}}$ обладает обширной зоной использования, начиная с $\ell = 2,8 \dots 11$ м и при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ с $\ell = 4 \dots 225$ м в зависимости от P . Гидрообъемный привод оптимален до $\ell = 4 \dots 225$ м и мощности $P \leq P_{\text{нт}}$ при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$, механический привод на расстоянии $\ell < 2,8 \dots 11$ м при $\Phi = \Phi_{\text{вр}}$ и $\ell < 1,6 \dots 3$ м, при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$.

Полученные оптимальные зоны применения различных систем передачи энергии не являются "застывшими" и будут изменяться по мере внедрения в производство достижений научно-технического прогресса и под влиянием специально для этого направленных научно-исследовательских и конструкторских работ. Другая конфигурация зон может быть получена при снятии и изменении ограничений, принятых в ходе обоснования исходных данных для синтеза, например, если требуется регулировать скорость рабочего органа.

1.3.4. Синтез структуры системы по частным показателям

В ряде случаев, может быть поставлена задача разработки системы передачи энергии, например, с наивысшей эффективностью выполнения главной функции, надежностью или наименьшей массой, также, как было показано в п.1.3.3 при отдельных условиях использования системы, ее оптимальная структура должна быть уточнена по одной из частных показателей качества системы. По этим причинам проведем синтез структуры системы по частным показателям.

Результаты синтеза структуры по эффективности функционирования системы, т.е. когда критерием оптимальности искомой системы $S \in M_{\text{сд}}$ будет $K'_2 = \min$, приведены на рис.1.19...1.22. При $\Phi = \Phi_{\text{вр}}$, $n = 1$ и $\ell < 7 \dots 15$ м оптимальной является система механического привода S_M , при $\ell > 7 \dots 13$ м и $P > 3,7$ кВт - сис-

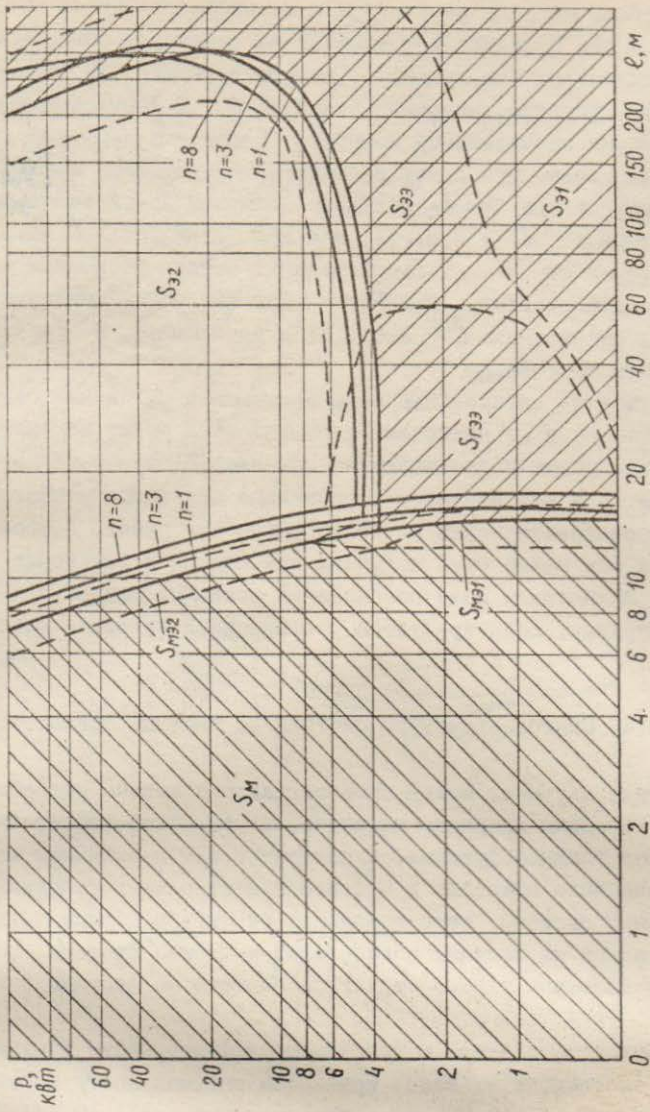


Рис. 1.19. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по критерию эффективности при $\Phi = \Phi_{\text{пр}}$.

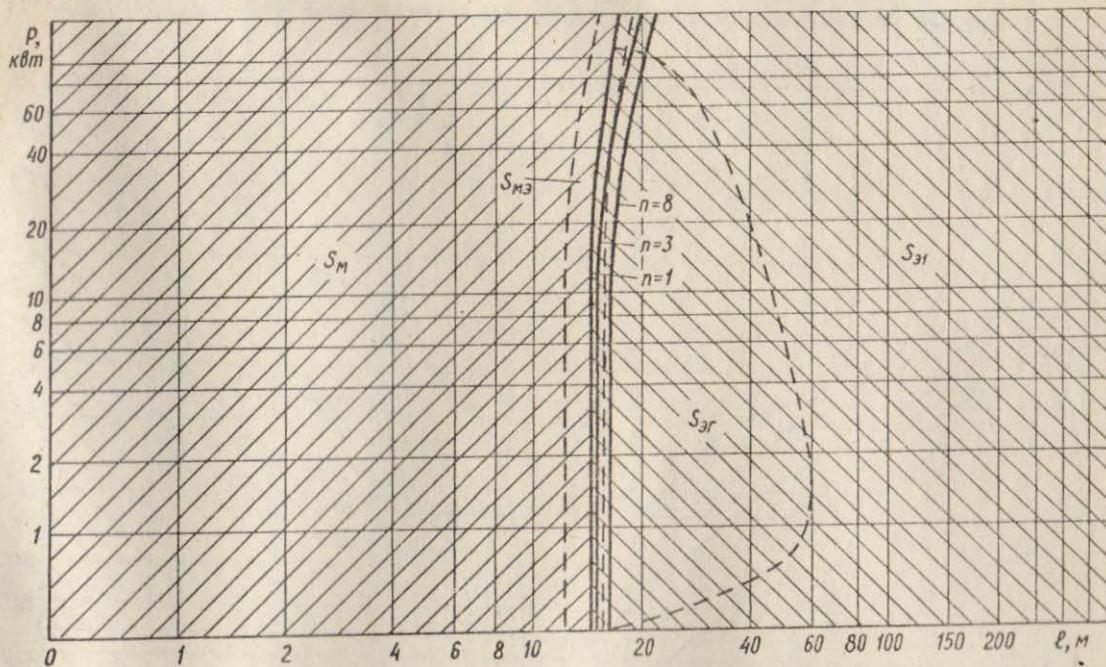


Рис. I.20. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по критерию эффективности при $\Phi = \Phi_{\text{гр}}$ без учета системы автономного электропривода повышенной частоты $S_{ЭГ}$.

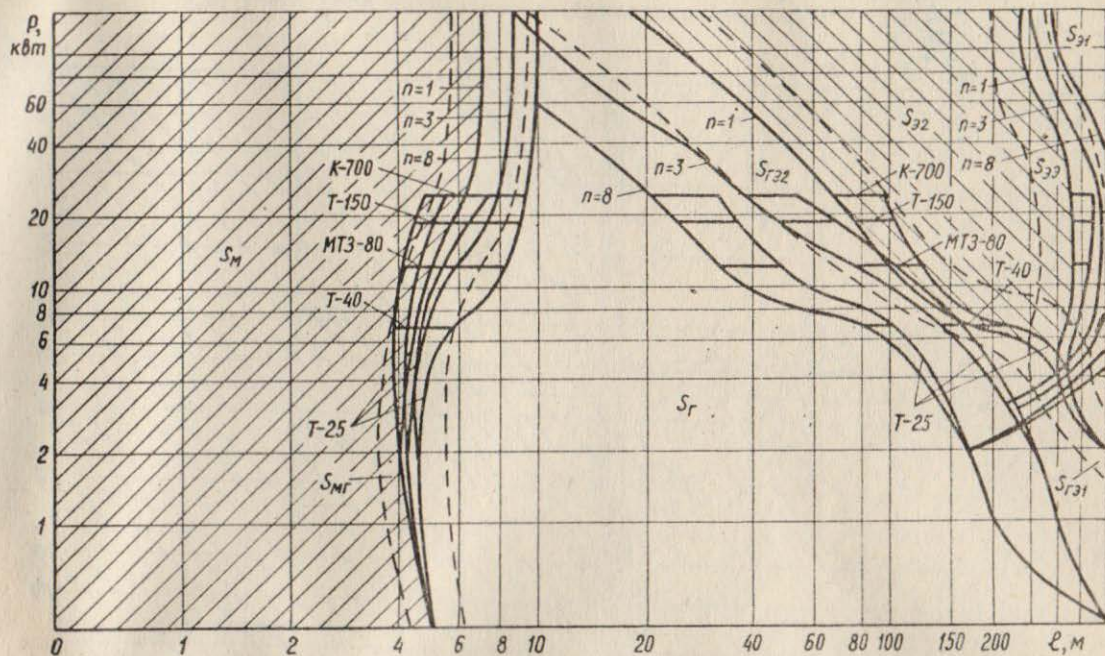


Рис. I.21. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по критерию эффективности при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$.

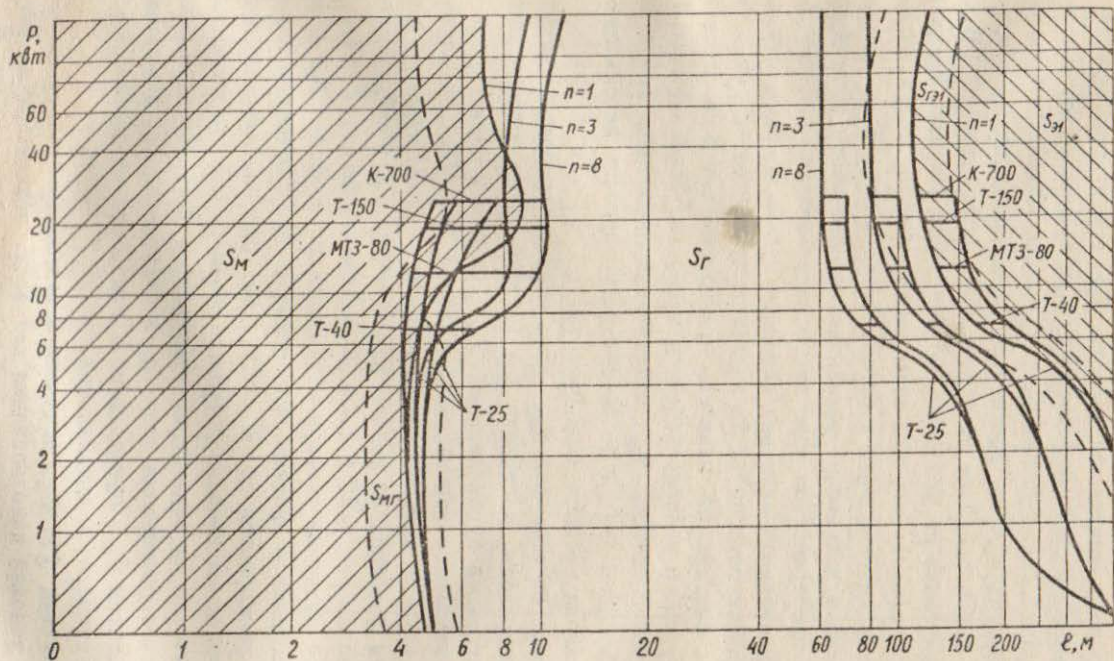


Рис. I.22. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по критерию эффективности при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ без учета системы автономного электропривода повышенной частоты S_{32} .

тема электропривода повышенной частоты S_{32} , в других случаях следует использовать систему электропривода промышленной частоты S_{31} (см. рис. I.19). Системы S_{31} , S_{32} и S_r обладают близкими значениями эффективности на достаточно обширной площади, в пределах которой выбор одной из систем требует уточнения.

Синтез при таких же условиях, но без учета системы S_{32} показывает (см. рис. I.20), что при этом, если $l < 15...17$ м, оптимальной является система S_M , в остальных случаях - S_{31} . Граница между их зонами достаточно устойчива, однако часть зоны S_{31} перекрывается пространством возможного использования системы S_r .

При поступательном движении рабочего органа $\Phi = \Phi_{\text{пот}}$ и $n = 1$ система механического привода S_M является лучшей до $l = 5...9$ м (см. рис. I.21), система S_r является предпочтительней на расстояниях $l < 18...400$ м в зависимости от мощности. Зона оптимального использования системы S_{32} находится правее зоны S_r . И только при $l > 230$ м при $P > 40$ кВт целесообразно использование электропривода промышленной частоты.

При синтезе системы без S_{32} зона системы гидропривода S_r несколько расширяется, достигая $l = 1...400$ м, на больших расстояниях оптимальной будет система S_{31} (см. рис. I.22).

Зоны оптимального использования систем $S \in M_{сд}$, в случае синтеза структуры по критерию предпочтения $\rho'(t) = \min$ или по вероятности безотказной работы для $\Phi = \Phi_{8p}$ и $\Phi = \Phi_{\text{прост}}$ даны соответственно на рис. I.23 и I.24. В первом случае до $l = 4...7$ м более надежной является система механического привода S_M , на больших расстояниях - система гидропривода S_r . Во втором случае зона S_r расширяется до $l = 4,6...7$ м. Системы автономного электропривода по надежности уступают обоим другим. Надежность систем практически не зависит от мощности. С увеличением n зона S_r сужается за счет расширения зоны S_M и относительного улучшения надежности системы S_{31} , приводящего к тому, что на больших расстояниях она становится оптимальной.

Поиск системы $S \in M_{сд}$, обладающей наибольшим к.п.д. $\eta' = \min$ для заданных условий использования дал зоны, показанные на рис. I.25 и I.26. При $\Phi = \Phi_{8p}$ начиная с $l = 5,5...13$ м наибольшим к.п.д. обладает система S_{31} (см. рис. I.25), на меньших расстояниях система механического привода S_M , обладающая наилучшей

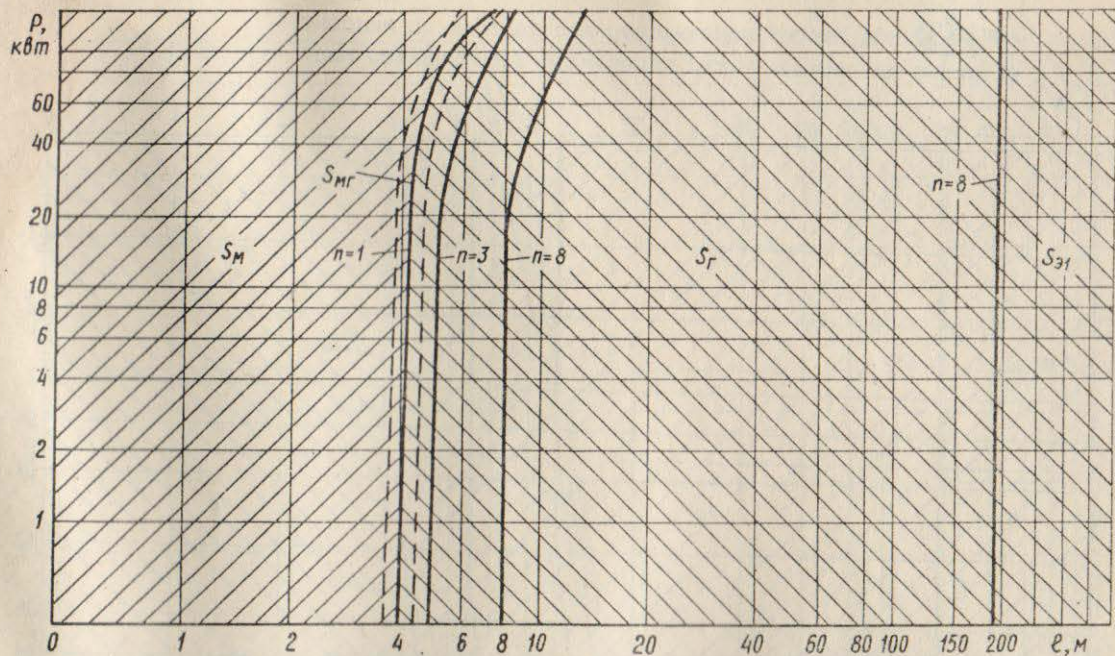


Рис. I.23. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по вероятности безотказной работы при $\Phi = \Phi_{8p}$.

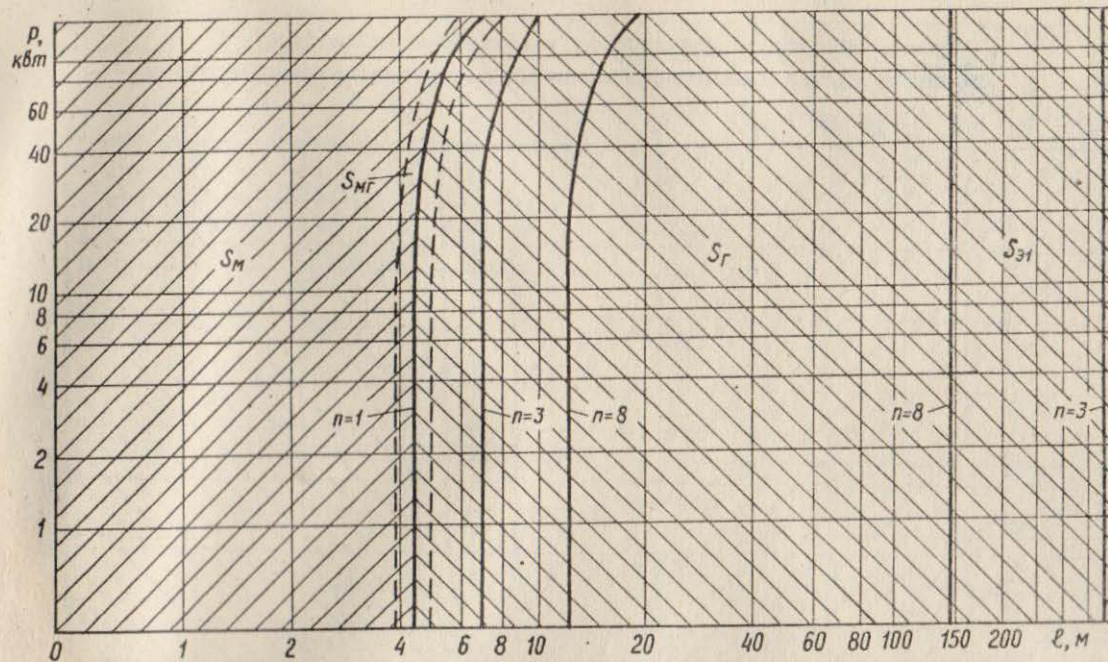


Рис. I.24. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по вероятности безотказной работы при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$.

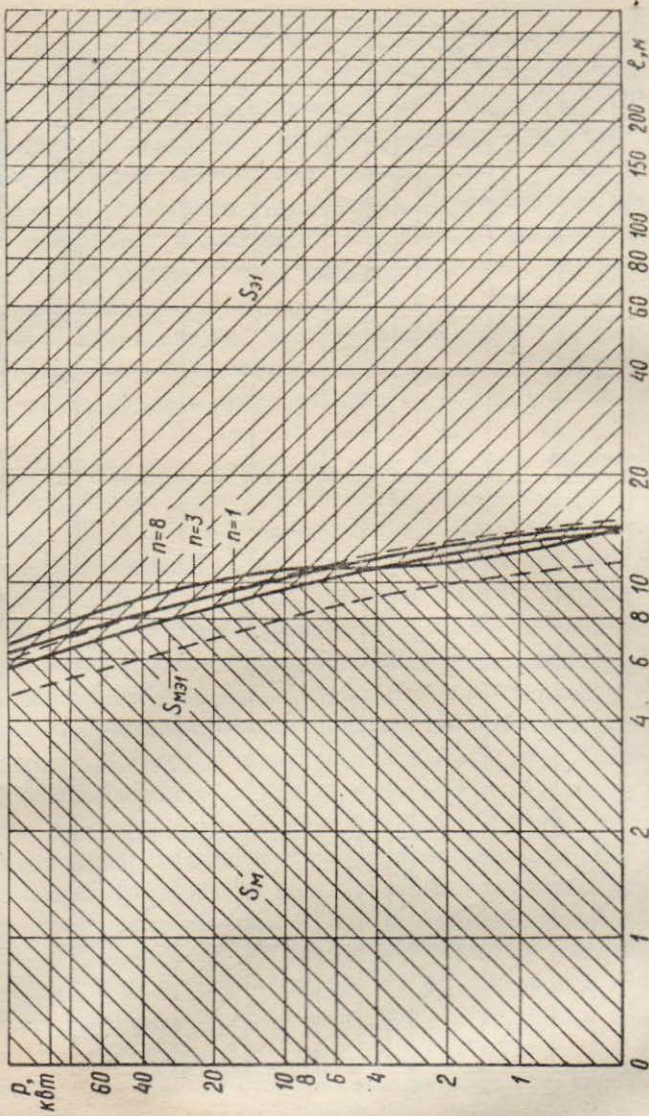


Рис. 1.25. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по к.п.д. при $\Phi = \Phi_{\text{opt}}$.

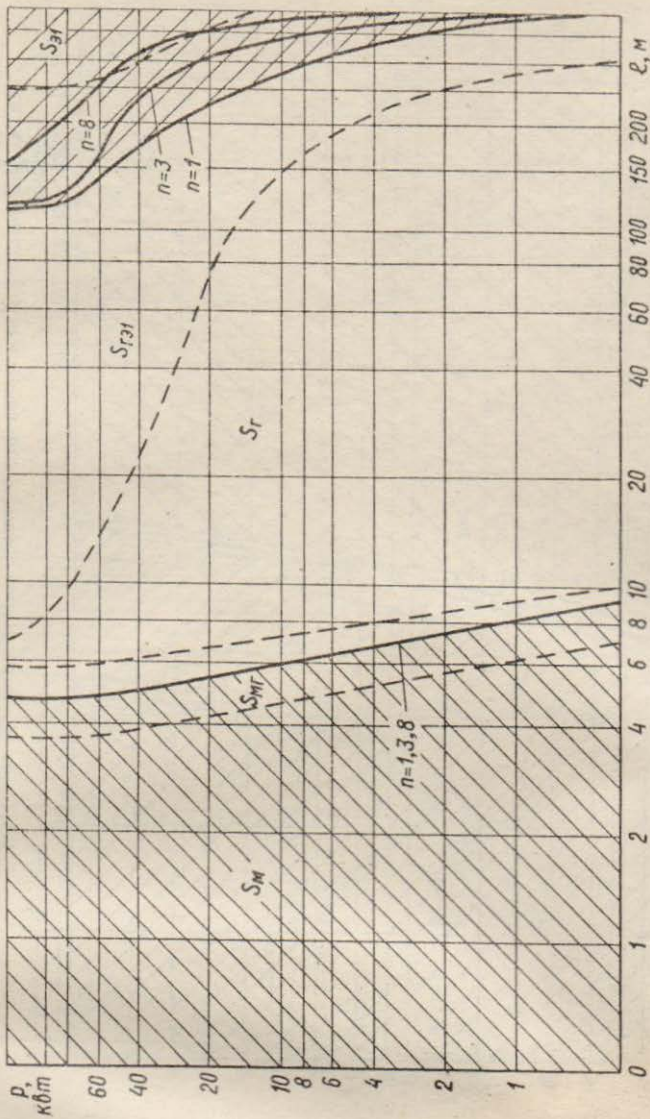


Рис. 1.26. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по к.п.д. при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$.

функциональной организованностью. Система объемного гидропривода S_r с низкими значениями к.п.д. гидромашин и значительными потерями давления в гидрوليнии, также система электропривода повышенной частоты с большими потерями в линии ввиду пониженного номинального напряжения обладают худшими значениями к.п.д. во всем рассматриваемом пространстве.

При $\Phi = \Phi_{\text{пест}}$ параметры гидросистемы S_r улучшаются и ее использование становится возможным от $\ell > 4,8 \dots 9$ до $\ell = 120 \dots 400$ м (см. рис. I.26). Вместе с тем, следует отметить, что на больших расстояниях ввиду близких значений к.п.д. систем, четкую границу зон определить трудно, поэтому целесообразно прибегнуть к другим показателям качества системы. В обоих случаях число рабочих органов существенного влияния на к.п.д. систем не оказывает.

Синтез структуры систем по минимуму массы $m'_p = \min$ дал следующие результаты. Если рабочий орган вращается, при больших мощностях до $\ell = 3,5$ м наименьшей массой обладает система механического привода S_M , начиная с $P = 10$ кВт по мере снижения мощности зона S_M существенно сужается (рис. I.27). На больших расстояниях оптимальной является система S_{32} и только при $\ell > 340$ м и $P > 60$ кВт система S_{31} . Исключение системы S_{32} существенно расширяет зону S_M , ввиду значительной удельной массы электрических машин промышленной частоты и большой массы рабочей жидкости в гидросистеме (рис. I.28). При этом систему S_r целесообразно использовать при $\ell = 9 \dots 78$ м.

При поступательном движении рабочего органа, при $P \leq P_{\text{нт}}$, объемный гидропривод легче других типов приводов до $\ell = 18$ м, что во многом обусловлено использованием при малых мощностях гидросистемы трактора (рис. I.29). При больших мощностях и $\ell \leq 4$ м оптимальна система S_M . В остальных случаях - система S_{32} и только при $\ell > 350$ м и $P > 100$ кВт - S_{31} . Если при этих же условиях не учитывать S_{32} , ее зону до $\ell = 110 \dots 135$ м занимает система S_r , остальное S_{31} (рис. I.30).

Таким образом, закономерности оптимального использования различных систем передачи энергии при синтезе по критерию эффективности примерно соответствует закономерностям расположения зон при синтезе по вектору эксплуатационных свойств. Результаты

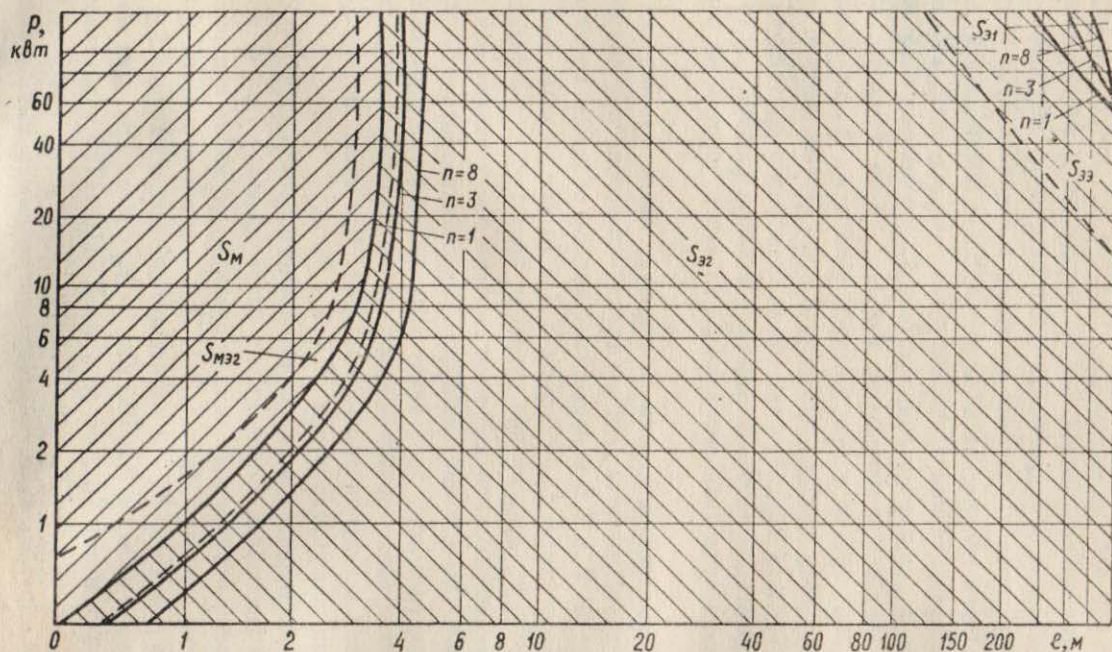


Рис. I.27. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по минимуму массы при $\Phi = \Phi_{\delta\rho}$.

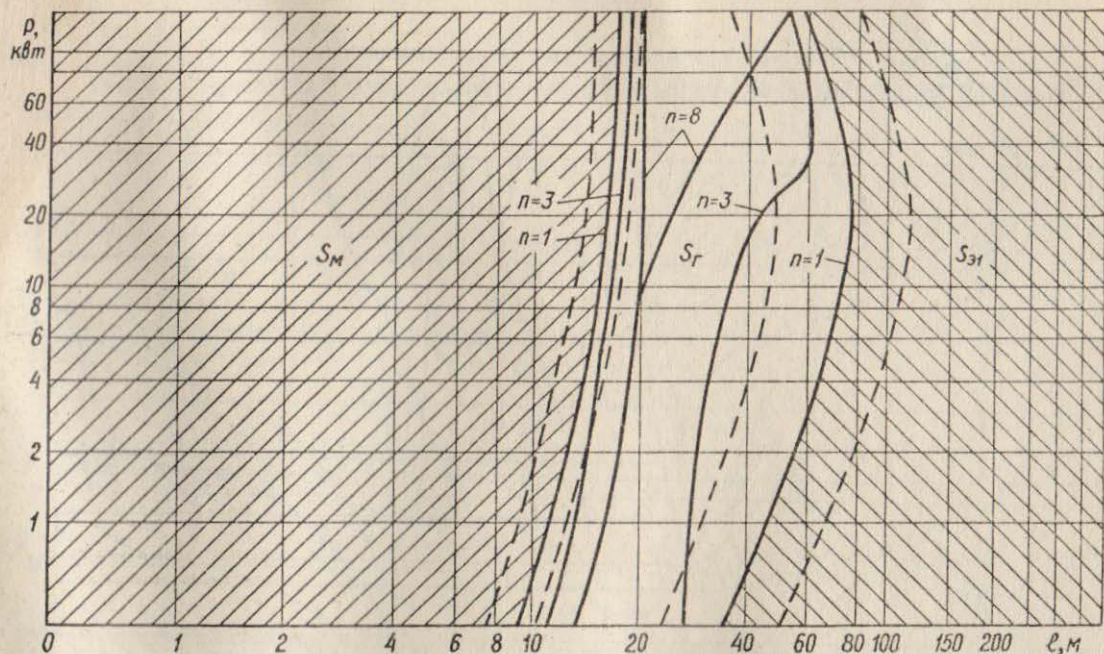


Рис. I.28. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по минимуму массы при $\Phi = \Phi_{\text{ср}}$ без учета системы автономного электропривода повышенной частоты S_{32} .

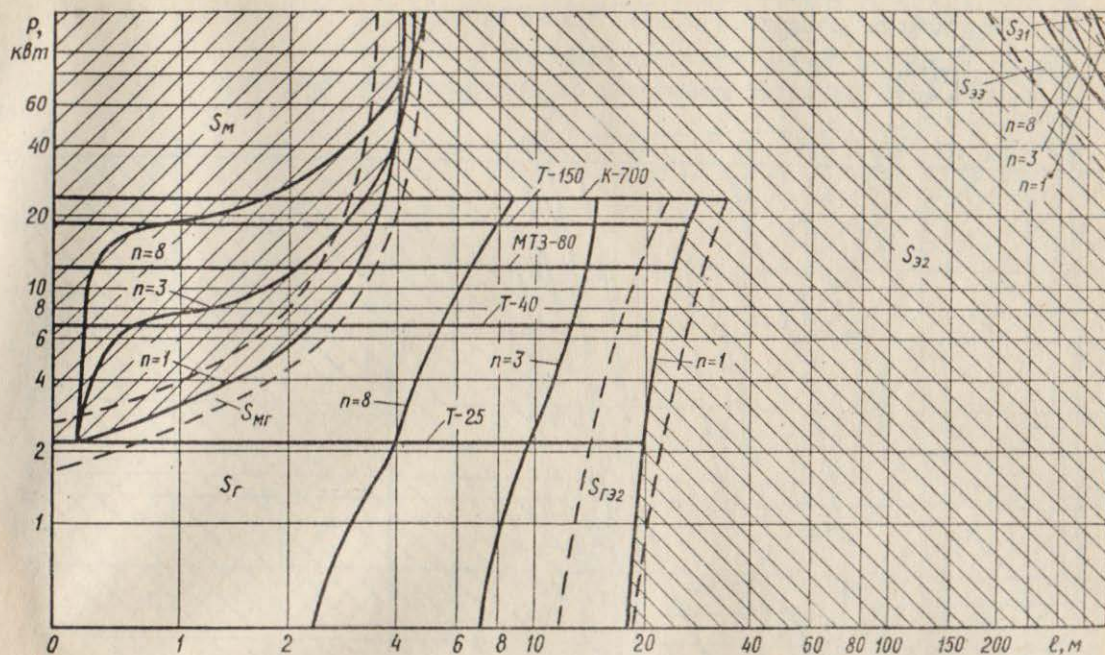


Рис. I.29. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по минимуму массы при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$.

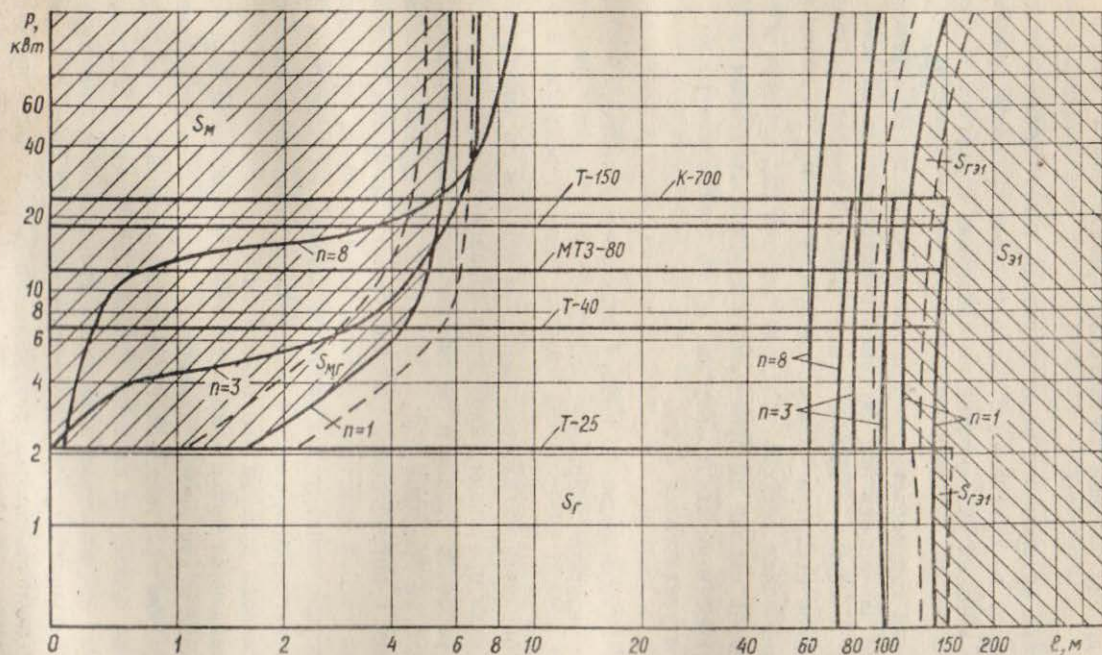


Рис. I.30. Зоны оптимального применения различных систем передачи энергии по минимуму массы при $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ без учета системы автономного электропривода повышенной частоты $S_{Э1}$.

синтеза по другим частным показателям эффективности систем показывают:

- система автономного электропривода имеет лучшее к.п.д. и меньшую массу по сравнению с гидрообъемным приводом при $\Phi = \Phi_{\text{гп}}$, но обладает меньшей надежностью по сравнению с другими системами;

- система гидрообъемного привода обладает преимуществом в показателе надежности над системой электропривода во всем диапазоне ℓ и обладает лучшим к.п.д. и малой массой при $\Phi = \Phi_{\text{гст}}$, но имеет низкое к.п.д. и большую массу при $\Phi = \Phi_{\text{гп}}$;

- механическая система обладает большей надежностью и к.п.д., меньшей массой по сравнению с другими системами на небольшой дальности передачи энергии, но ее показатели резко ухудшаются с увеличением ℓ .

1.3.5. Рекомендации по выбору оптимальной системы передачи энергии

Выбор оптимальной системы передачи энергии по вышеприведенным графикам производят следующим образом. В зависимости от назначения рабочего органа и рассматриваемых типов передачи выбираем один из графиков рис. I.15...I.18. По другим условиям использования - потребляемой рабочим органом мощности и удаленности его от ВОМ трактора, рассчитанной по пути, проходящему через несущие конструкции рабочего органа, на плоскости P, ℓ находим соответствующую точку и выясняем, к зоне оптимального применения какого привода она относится.

Если найденная точка находится в части графика с неустойчивой границей между зонами применения систем, где нехуже являются два или три типа систем, окончательный выбор следует произвести по одному из частных показателей качества системы.

В случае предъявления повышенных требований к качеству выполнения технологического процесса и качеству системы привода, следует воспользоваться результатами синтеза по показателю эффективности системы. Это, например, относится к машинам по уходу за виноградниками и садами; чувствительными к качеству проведения технологических процессов и где возможно использо-

вание электрифицированного ручного инструмента.

При приводе рабочих органов, вынесенных на небольшие расстояния, до $\ell = 4 \dots 6$ м, когда масса каждой из систем мало зависит от расстояния, следует в первую очередь обратить внимание на надежность систем (навесные косилки, пресс-подборщики, опрыскиватели).

В системах приводов передающих энергию на расстояния свыше $\ell = 4 \dots 6$ м в качестве дополнительного условия предпочтения целесообразно принять массу, возрастание которой с увеличением ℓ становится существенным (широкозахватные косилки и жатки, дождевальные агрегаты и т.п.).

К.п.д. систем S_3 и S_7 мало изменяется в зависимости от условий использования систем, по этой причине он может быть использован в качестве дополнительного критерия оптимальности на расстояниях $\ell > 9 \dots 15$ м, а также второго дополнительного критерия, если первый не выявил лучшую систему.

В качестве примера выберем оптимальный привод рабочих органов контурного обрезчика крон плодовых культур МКО-3. Завод эту машину выпускает с гидрообъемным приводом режущих аппаратов и гидравлическим приводом механизма раздвижения и подъема рабочих органов. Мощность каждой из восьми режущих аппаратов обрезчика составляет $P = 3,8$ кВт, среднее расстояние передачи энергии $\ell = 14$ м, рабочие органы представляют собой дисковые пилы совершающие вращательное движение $\Phi = \Phi_{\text{вр}}$. На рис. I.15 находим точку соответствующую заданным условиям работы и убеждаемся, что она находится в зоне оптимального использования системы электропривода повышенной частоты S_{32} .

Если не учитывать систему S_{32} и воспользоваться рис. I.17, то можно убедиться, что оптимальным приводом обрезчика является система электропривода промышленной частоты /33,36,38-41/.

Для раздвижения и подъема режущих аппаратов необходимы два привода поступательного движения $\Phi = \Phi_{\text{пост}}$ с мощностью $P = 3,4$ кВт. и средним расстоянием от ВОМ трактора $\ell = 6,9$ м. По рис. I.16 и I.18 находим, что в этом случае оптимальным является система гидропривода.

Определение оптимальной структуры построения СХМ с несколькими рабочими органами различной мощности и удаленностью

от ВОМ следует проводить с использованием ПЭВМ по предлагаемой программе.

Рекомендуемые системы приводов для некоторых агрегируемых тракторами экспериментальных и серийно выпускаемых машин приведены в табл. I.8.

Таблица I.8

Рекомендуемые системы приводов некоторых сельскохозяйственных машин

Сельскохозяйственная машина	Функциональное назначение	Система привода				
		существующая	рекомендуемая с S ₂₂	рекомендуемая без S ₂₂		
I	1	2	3	4	5	
1. Опрыскиватель прицепной вентиляторный ОПВ-1200А	Ф _{вр}		S _м	S _м	S _м	
2. Жатка валковая прицепная ЖВЛ-6А						
- рабочие органы	Ф _{вр}		S _м	S _м	S _м	
- подъем мотовила, привод вариатора	Ф _{пост}		S _г	S _г	S _г	
3. Косилка роторная навесная КРН-2, IА	Ф _{вр}		S _м	S _м	S _м	
4. Пресс-подборщик ППЛ-Ф-1,6М	Ф _{вр}		S _м	S _м	S _м	
5. Погрузчик тюков и рулонов ПТ-Ф-500	Ф _{пост}		S _г	S _г	S _г	
6. Машина для сплошной уборки качанной капусты УКМ-2	Ф _{вр}		S _г	S ₂₂	S _г	
7. Машина для контурной обрезки плодовых деревьев МКО-3						
- рабочие органы	Ф _{вр}		S _г	S ₂₂	S ₂₁	
- раздвижение и подъем рабочих органов	Ф _{пост}		S _г	S _г	S _г	
8. Машина для чеканки сильно-рослых виноградников ЧВС						
- рабочие органы	Ф _{вр}		S _г	S ₂₂	S ₂₁	
- подъем рабочих органов	Ф _{пост}		S _г	S _г	S _г	

	1	2	3	4	5
9. Электрифицированная дождевальная машины ЭДМР "Кубань" -Л		$\Phi_{вр}$	S_{31}	S_{32}	S_{31}
10. Электрифицированный жатвенный агрегат с-за "Придонский"					
- рабочие органы		$\Phi_{вр}$	S_{31}	S_{32}	S_{31}
- подъем мотовила, привод вариатора		$\Phi_{пост}$	$S_{г}$	$S_{г}$	$S_{г}$
11. Широкозахватный жатвенный агрегат ВИСХОМ		$\Phi_{вр}$	S_{31}	S_{32}	S_{31}
12. Мобильный сельскохозяйственный агрегат модульного исполнения ЧИМЭСХ		$\Phi_{вр}$	S_{31}	S_{32}	S_{31}

В ы в о д ы

1. Объектом изучения является система передачи энергии, состоящая в общем случае из преобразователя механической энергии в другой вид энергии, устройства передачи энергии, двигателя рабочего органа и аппаратуры управления. Цель системы - передать энергию от первичного источника к рабочим органам. Сравнение типов систем производим для отрезка жизненного цикла, соответствующего стадии использования по назначению.

2. Полная объективная оценка систем передачи энергии к рабочим органам мобильных машин может быть осуществлена по комплексному критерию "эффективность-стоимость", качества выполнения системой главной функции. Эффективность является функцией надежности, технических, энергетических, технологических, эргономических свойств и позволяет учесть следующие единичные показатели систем: вероятность безотказной работы, массу, степень свободы рабочего органа, типоразмерный ряд, гибкость, к.п.д., кратность пускового и максимального момента, безвредность, безопасность и эргономичность.

3. Для повышения эффективности поиска оптимальной структуры системы передачи энергии предложена целевая функция результирующего показателя эффективности, построенная на основе экспертных оценок. При синтезе учтен уровень функционально-структурного

совершенства систем, для чего произведен анализ структурной, функциональной и функционально-структурной моделей и определен коэффициент функциональной организованности систем.

4. Установлено, что зоны оптимального применения конкурирующих вариантов передачи энергии к рабочим органам сельскохозяйственных агрегатов зависят от функционального назначения рабочего органа, дальности передачи, передаваемой мощности и числа рабочих органов.

5. Зоны оптимального применения автономных систем передачи энергии с различной структурой построения:

- система автономного электропривода повышенной частоты при вращательном движении рабочего органа обладает обширной зоной использования, начиная с $\ell = 2,8 \dots 11$ м, например, машина для уборки капусты УКМ-2, машина для чеканки виноградников ЧВЛ, при поступательном движении рабочего органа зона ее оптимальности постепенно расширяется, начиная с $\ell > 220$ м при $P = 1 \text{ кВт}$ до $\ell > 4$ м при $P = 150 \text{ кВт}$;

- система автономного электропривода промышленной частоты оптимальна на дальности передачи $\ell > 230 \dots 400$ м, например, дождевальная машина ЭДМЭ "Кубань-Д";

- при $P < P_{нт}$ гидропривод является лучшей на расстояниях до $\ell = 200 \dots 220$ м для создания поступательного движения, например, погрузчик тюков и рулонов ПТ-Ф-500, подъемный механизм мотовила жаток;

- механический привод оптимален на расстояниях до $\ell = 2,8 \dots 11$ м при вращательном движении рабочего органа, например, пресс-подборщик ППЛ-Ф-1,6М, ротационная косилка КРН-2, 1А;

- если не учитывать электропривод повышенной частоты, система электропривода промышленной частоты при вращательном движении рабочего органа становится оптимальной на расстоянии передачи энергии $\ell > 7 \dots 17$ м, например, контурный обрезчик крон деревьев МКО-3.

Наивысший эффект можно ожидать от электрификации сложных рабочих машин с вынесенными рабочими органами, используемых в садоводстве, виноградарстве и овощеводстве с интенсивной механизацией технологических процессов и высокими требованиями к их качеству, а также широкозахватных уборочных машин.

6. При малых расстояниях передачи энергии границы зон имеют достаточно высокую устойчивость и могут быть определены с точностью $\pm 0,3 \dots 0,8$ м по расстоянию передачи энергии. С увеличением дальности границы зон размыты на значительных диапазонах расстояния передачи и требуют уточнения по дополнительным условиям предпочтения.

7. Уточнение оптимальной системы по частным показателям качества рекомендуется проводить следующим образом: при предъявлении повышенных требований к качеству выполнения технологического процесса, целесообразно обратиться к результатам синтеза по показателям эффективности системы; при приводе рабочих органов, вынесенных на небольшие расстояния до $\ell = 4 \dots 5$ м, следует в первую очередь обратить внимание на надежность систем; при $\ell > 4 \dots 5$ — на массу.

8. Приведена методика выбора оптимальной структуры систем по разработанным графикам и даны рекомендации по выбору типа приводов для различных машин.

9. Следующей ступенью синтеза системы автономного электропривода является оптимизация параметров системы по частным показателям качества для различных режимов работы. Также результаты определения зоны оптимального применения системы требуют экспериментального подтверждения.

2. ТЕОРИЯ МОБИЛЬНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

2.1. Классификация режимов работы автономной системы электропривода мобильной машины

В общем случае мобильный сельскохозяйственный агрегат с электроприводом рабочих органов (рис.2.1), состоит из первичного двигателя внутреннего сгорания ДВС трактора, трансмиссии Т трактора, генератора электрической энергии Г, подключенного к ВОМ трактора, аппаратуры управления и защиты АУиЗ, кабельной линии КЛ и электродвигателей ЭД1...ЭД n привода рабочих органов РО1...РО n электрифицированной сельскохозяйственной машины ЭСХМ, транспортируемой МЭС. С ДВС снимаются два потока мощности, на электрический генератор Г и двигатели ДВ трактора. Оператор может оказывать воздействие на режимы работы ДВС путем перемещения рейки топливного насоса, трансмиссии – выключением муфты сцепления и переключением передач, электрических машин – через аппаратуру управления.

Множество электрифицированных мобильных машин, несмотря на различный характер выполняемых ими технологических операций, существенные отличия в конструкции рабочих органов и описывающих их приводных характеристик, имеют единый принцип работы и

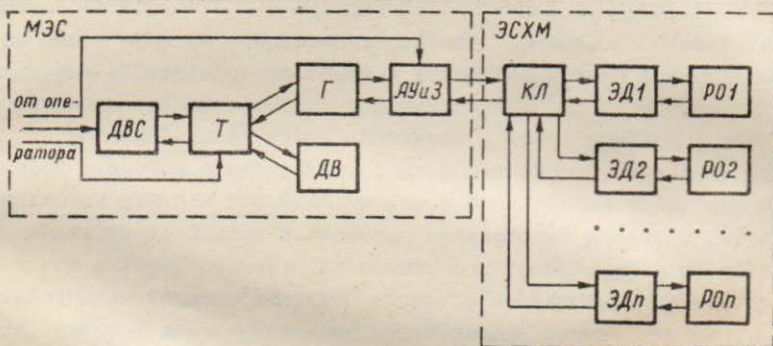


Рис.2.1. Структурная схема мобильного электрифицированного сельскохозяйственного агрегата.

могут быть объединены по общему признаку - режимам работы автономной системы электропривода при изменяющихся условиях эксплуатации $Y = \{Y_u, Y_B, Y_p\}$.

Работа системы автономного электропривода S_3 является циклично-повторяющейся (рис.2.2) и содержит следующие режимы: возбуждения генератора Y_{p1} , пуска двигателя Y_{p2} , трогания агрегата с места Y_{p3} , проведения технологического процесса Y_{p4} , выключения двигателей Y_{p5} и гашения поля генератора Y_{p6} . Здесь режимы возбуждения генератора Y_{p1} и пуска двигателей Y_{p2} реализовываются при неподвижном агрегате, в отдельных случаях эти режимы можно осуществить при движущемся агрегате, т.е. при другом состоянии внешней среды, тогда их соответственно обозначим Y_{p1}^n и Y_{p2}^n , при этом режим Y_{p3} исключается (см. внешние секторы рис.2.1). Также, в общем случае, при проведении технологического цикла Y_{p4} , работа электропривода под нагрузкой Y_{p4}^H чередуется с холостым ходом Y_{p4}^X , например, при разворотах агрегата.

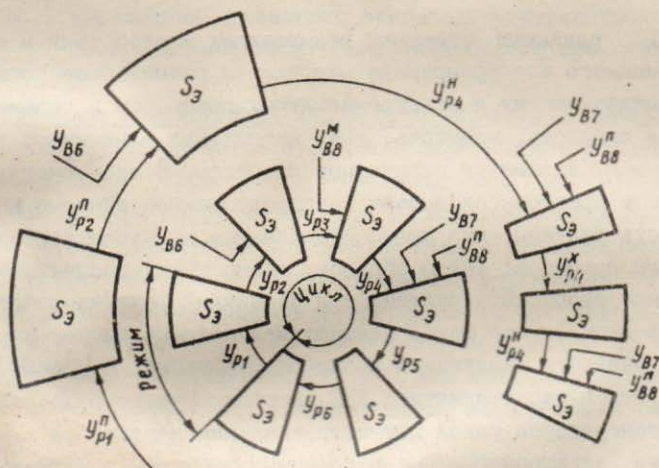


Рис.2.2. Схема замкнутого цикла режимов работы системы автономного электропривода.

На устойчивость и качество работы системы в режиме Y_{P2} пуска двигателя влияют дестабилизирующие воздействия Y_{B6} , связанные с особенностями характеристик рабочих органов и асинхронных двигателей, в режиме Y_{P3} трогания агрегата с места - Y_{B8}^M обусловленные включением в систему поступательно движущейся массы агрегата, и, наконец, в ходе технологического процесса Y_{P4} возможны воздействия Y_{B7} со стороны рабочего органа в виде технологических перегрузок и Y_{B8}^n со стороны ходовой части агрегата, например, при преодолении препятствия по ходу движения агрегата. Во всех случаях работа системы будет зависеть от режимов работы дизеля. В режимах Y_{P1}^n и Y_{P2}^n дизель трактора работает на других характеристиках, чем при Y_{P1} и Y_{P2} .

Приведенная классификация режимов работы системы автономного электропривода позволяет систематизировать ее анализ и способствует выявлению основных критериев оптимизации параметров.

2.2. Системное моделирование процессов в автономном электроприводе

Под влиянием внешних возмущающих воздействий в системе автономного электропривода нарушается равновесное состояние электромеханических и электромагнитных процессов и параметры режима - скорость, мощность, ток, напряжение - начинают изменяться, т.е. возникают переходные процессы. В свою очередь, переходные процессы оказывают непосредственное влияние на устойчивость системы, что прямо сказывается на качестве технологического процесса. Таким образом, важно уметь рассчитывать переходные процессы в системе при различных режимах работы, только в этом случае можно осуществить оптимизацию ее параметров и произвести надлежащий выбор оборудования. При этом необходимо учесть характеристики ДВС, особенности устройства автономных генераторов малой мощности, падение напряжения в кабельной линии, электромагнитные переходные процессы и нелинейности в электрической и магнитной цепях электрических машин. Также следует иметь в виду, что привод рабочих органов может быть многодвигательным /27,29/.

Поставленную задачу целесообразно решить на основе системного моделирования, позволяющего построить универсальную модель системы автономного электропривода.

Для описания поведения системы в любой момент времени, использована единая математическая характеристика - переменная состояния. Описание при ее помощи позволяет представить рассматриваемую систему соответствующими совокупностями дифференциальных уравнений первого порядка и функциональных соотношений (алгебраических уравнений) вида

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), u(t), t); \quad (2.1)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), t), \quad (2.2)$$

где $x(t)$ - переменные состояния, $u(t)$ - входные переменные, $y(t)$ - выходные переменные, t - время. Как будет показано ниже, в рассматриваемом случае в качестве переменных состояния целесообразно выбрать потокосцепления и далее токи в обмотках электрических машин.

2.2.1. Уравнения первичного двигателя внутреннего сгорания мобильного энергетического средства

Уравнения регуляторных характеристик. Регуляторной характеристикой двигателя называется зависимость его крутящего момента от угловой скорости его коленчатого вала $M' = f(\Omega)$ при изменении внешней нагрузки от нуля до максимальной и при перемещении органа управления топливного насоса автоматическим регулятором при неизменном положении рычага управления / 21, 74 /.

При установке на двигателе всережимного регулятора практически все возможные режимы (за исключением работы по внешней характеристике) располагаются на той или иной регуляторной характеристике, поэтому они являются одним из важнейших показателей работы дизеля.

Общий вид характеристик дизеля со всережимным регулятором и корректором подачи топлива показан на рис.2.3. Здесь оси моментов и скоростей обозначены так, как это принято в теории электропривода.

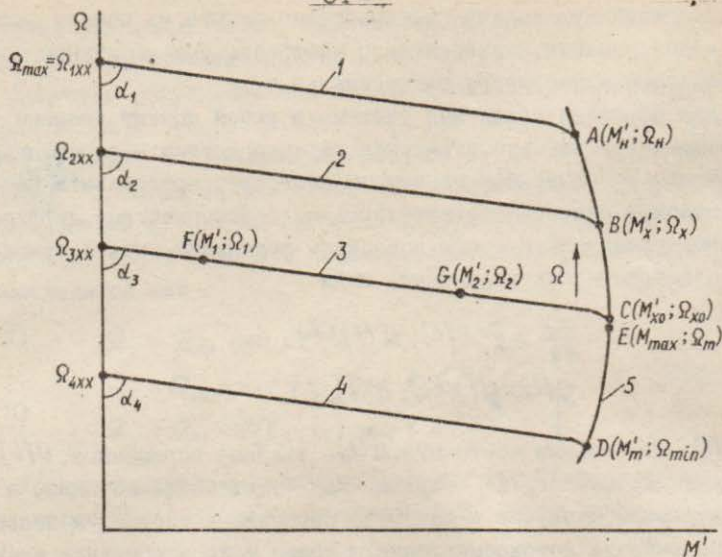


Рис.2.3. Характеристики дизеля со всережимным регулятором.

Точки А, В, С и Д внешней характеристики 5, являющиеся начальными точками основной I и частичных 2, 3 и 4 регуляторных характеристик, представляющих собой прямые линии, определяются выбранным водителем положением рычага акселератора. Угол между прямыми 1...4 и осью скорости со снижением скоростного режима имеет тенденцию к некоторому уменьшению $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4$. Но в диапазоне скоростей, рассчитываемом нами, этот угол практически неизменен и равен α_1 .

Рассмотрим работу дизеля со всережимным регулятором. Пусть дизель работает в установившемся номинальном режиме в точке А ($M'_H; \Omega_H$). При любом изменении момента сопротивления потребителя от номинального до нуля, угловая скорость двигателя в соответствии с прямой I поддерживается в пределах от номинальной Ω_H до скорости холостого хода Ω_{1xx} , которая в данном случае будет равна максимально допустимой для дизеля скорости Ω_{max} .

В случае изменения момента сопротивления в сторону увеличения от номинального, крутящий момент двигателя также увеличивается по кривой 5, пока не уравнивает момент сопротивле-

ния потребителя. На участке AF дизель работает устойчиво, в точке E момент дизеля достигает максимального значения M'_{max} и возрастание момента сопротивления свыше M'_{max} приводит к остановке двигателя. Аналогично дизель работает на других регуляторных характеристиках.

В литературе приводится следующая эмпирическая формула для расчета и построения внешней скоростной характеристики двигателя с воспламенением от сжатия со струйным распыливанием / 6, 42, 44 /

$$M' = M'_H \left[0,5 + 1,5 \frac{\Omega}{\Omega_H} - \left(\frac{\Omega}{\Omega_H} \right)^2 \right]. \quad (2.3)$$

Уравнения регуляторных характеристик можно получить, зная координаты двух любых точек, лежащих на них. Например, прямая, проходящая через точки $F(M'_1; \Omega_1)$ и $G(M'_2; \Omega_2)$ представляется уравнением

$$\begin{vmatrix} M'_2 - M'_1 & \Omega_2 - \Omega_1 \\ M' - M'_1 & \Omega - \Omega_1 \end{vmatrix},$$

которое можно записать в виде:

$$\frac{M' - M'_1}{M'_2 - M'_1} = \frac{\Omega - \Omega_1}{\Omega_2 - \Omega_1},$$

или

$$M' = M'_1 + (M'_2 - M'_1) \left(\frac{\Omega - \Omega_1}{\Omega_2 - \Omega_1} \right). \quad (2.4)$$

Таким образом, если через Ω_{x0} обозначить скорость соответствующую точке C пересечения внешней и регуляторной характеристик для заданного положения рычага акселератора, то соответствующие уравнения дизеля запишутся как

$$\left. \begin{aligned} M' &= M'_H \left[0,5 + 1,5 \frac{\Omega}{\Omega_H} - \left(\frac{\Omega}{\Omega_H} \right)^2 \right] \text{ при } \Omega < \Omega_{x0}; \\ M' &= M'_1 + (M'_2 - M'_1) \left(\frac{\Omega - \Omega_1}{\Omega_2 - \Omega_1} - \frac{\Omega_1}{\Omega_2 - \Omega_1} \right) \text{ при } \Omega > \Omega_{x0}. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

В нескольких случаях производят искусственное регулирование скорости дизеля, например, плавное его увеличение с целью

получения различных частот напряжения генератора. Рассмотрим уравнения характеристик дизеля для этих условий.

Допустим регулированием подачи топлива производим переход от прямой 3 к 2 (см. рис. 2.3). Пусть изменение скорости при этом происходит в промежутке времени от t_1 до t_2 с угловым ускорением ϵ , тогда за это время точка пересечения регуляторной характеристики с внешней скоростной будет перемещаться вдоль кривой 5 от точки С до В и скорость, соответствующая этой точке определится как

$$\left. \begin{aligned} \Omega_x &= \Omega_{x0} \text{ при } t < t_1; \\ \Omega_x &= \Omega_{x0} + \epsilon(t - t_1) \text{ при } t_1 \leq t < t_2; \\ \Omega_x &= \Omega_{x0} + \epsilon(t_2 - t_1) \text{ при } t \geq t_2. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Уравнение промежуточных скоростных характеристик, проходящих через Ω_x и параллельных прямой 3, будет иметь вид

$$M' = \frac{M_2 - M_1}{\Omega_2 - \Omega_1} \Omega - \frac{M_2 - M_1}{\Omega_2 - \Omega_1} \Omega_x + M_x'. \quad (2.7)$$

В последнем выражении M_x' найдем, воспользовавшись (2.3)

$$M_x' = M_N' \left[0,5 + 1,5 \frac{\Omega_x}{\Omega_N} - \left(\frac{\Omega_x}{\Omega_N} \right)^2 \right]. \quad (2.8)$$

Таким образом, уравнения характеристик дизеля при регулировании его скорости с ускорением ϵ в промежутке времени от t_1 до t_2 представляют собой систему из (2.5)...(2.8), и позволяют достаточно полно учесть свойства дизеля при исследовании любых режимов работы U_p системы автономного электропривода.

Дифференциальное уравнение движения первичного двигателя.
Вращающиеся части МЭС на базе трактора, представляют собой систему элементов, движение которых определяется их механическими связями и внешними возмущающими силами. В зависимости от условий работы, вал дизеля МЭС может ускоряться или замедляться, например, соответственно при уменьшении (сбросе) или увеличении подключенной к нему нагрузки. Поэтому, для анализа динамических процессов, протекающих в системе автономного электропривода, необходимо составить уравнение, устанавливающее соот-

ношение между моментами вращения дизеля и моментами сопротивления подключенных к дизелю элементов системы, другими словами - уравнение движения первичного двигателя МЭС. При выводе уравнения полагаем, что механические связи между элементами системы абсолютно жесткие и зазоры в передаточных звеньях отсутствуют.

Рассмотрим общий случай, когда электрифицированная рабочая машина прицеплена к МЭС, движение агрегата носит неустановившийся характер и поверхность земли имеет наклон к горизонту. На рис. 2.4. показан такой агрегат с нанесением действующих на него в продольной плоскости сил - движущих и сопротивления движению, а также основных крутящих моментов на валах МЭС. На рисунке принято, что движение происходит ускоренно и угол подъема, преодолеваемого агрегатом равен $\alpha / 28,77^\circ$.

На схему нанесены:

1. Толкающая сила $T_{дв}$, которая является равнодействующей касательной реакцией, возникающих между гусеничными движителями при их работе и поверхности земли. Эта сила направлена по движению машины и является движущей;
2. Горизонтальная составляющая $T_{п}$ равнодействующей реакции почвы, действующей на передние лобовые ветви гусениц при движении МЭС и возникающей вследствие деформации почвы под действием силы веса МЭС. $T_{п}$ направлена против движения;
3. Сила веса МЭС G_T ;
4. Сила инерции МЭС $F_{ат}$, возникающая вследствие неравномерной скорости прямолинейно-поступательного движения агрегата. В рассматриваемом случае ускоренного движения, сила инерции препятствует движению;
5. Сила сопротивления воздуха $F_{вт}$ движению МЭС;
6. Сила тягового сопротивления на кружке $F_{кр}$, создаваемое рабочей машиной;
7. Силы реакции $T_{гм}$ возникающей между поверхностью почвы и колесами машины под действием толкающей силы, приложенной к колесам со стороны остова машины. Сила направлена против движения;
8. Сила веса рабочей машины G_M ;
9. Сила инерции рабочей машины $F_{ам}$, возникающая вследствие

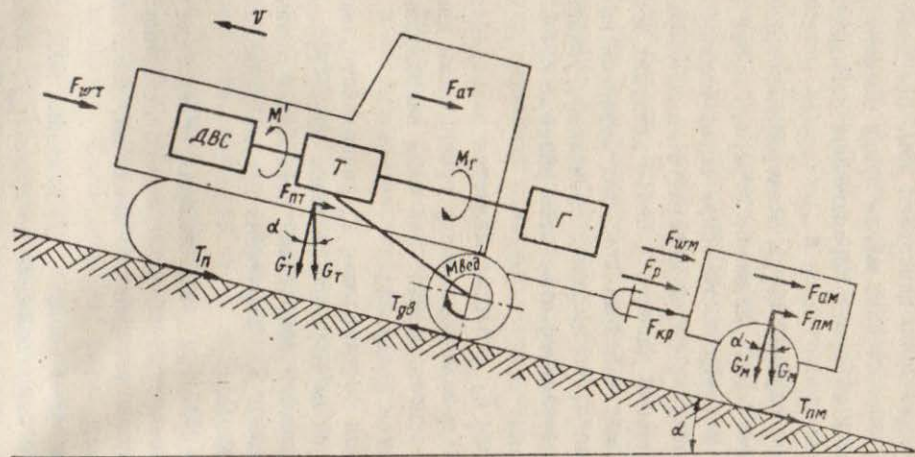


Рис.2.4. Схема сил, действующих на агрегат с гусеничным трактором в продольной плоскости.

неравномерной скорости прямолинейно-поступательного движения агрегата;

10. Сила сопротивления воздуха $F_{\text{воз}}$ движению рабочей машины;

11. Сила сопротивления F_p рабочих органов машины, выполняющих технологический процесс, движению агрегата.

Пренебрегая, как было сказано выше, влиянием неустановившегося режима работы на протекание рабочего процесса дизеля МЭС, уравнение движения коленчатого вала двигателя при неустановившемся движении можно представить в следующем виде

$$M' - \frac{M_{\text{вед}}}{i_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}} - \frac{M_{\text{г}}}{i_{\text{вон}} \eta_{\text{вон}}} = J_{\text{г}} \frac{d\Omega}{dt}, \quad (2.9)$$

где $M_{\text{вед}}$ - момент сопротивления ведущих колес трактора. Сюда входит и динамический момент, возникающий под действием прямолинейно-поступательно движущихся и вращающихся масс агрегата, за исключением ротора генератора; $i_{\text{тр}}$ и $\eta_{\text{тр}}$ - соответственно передаточное отношение и к.п.д. трансмиссии трактора; $M_{\text{г}}$ - момент сопротивления генератора; $i_{\text{вон}}$ и $\eta_{\text{вон}}$ - соответственно передаточное отношение и к.п.д. привода ВОМ; $J_{\text{г}}$ - момент инерции ротора генератора.

Момент сопротивления ведущих колес трактора можно представить в виде

$$M_{\text{вед}} = T_{\text{гв}} R_{\text{к}} + T_{\text{п}} R_{\text{к}} + M_{\text{Рг}} + M_{\text{Дг}}, \quad (2.10)$$

где $R_{\text{к}}$ - теоретический радиус ведущих колес трактора; $M_{\text{Рг}}$ - момент, затрачиваемый на преодоление внутренних потерь в двигателе, куда входят потери на трение в зацеплении ведущих колес со звеньями гусениц, в шарнирах звеньев, в подшипниках опорных катков, поддерживающих роликов и направляющих колес и другие; $M_{\text{Дг}}$ - динамический момент, возникающий под действием движущихся деталей гусеничного движителя и кинематически с ним связанных деталей трансмиссии и двигателя внутреннего сгорания (ДВС), приведенный к валу ведущего колеса.

Отношение

$$F_{\text{к}} = \frac{M_{\text{вед}}}{R_{\text{к}}} \quad (2.11)$$

назовем касательной силой сопротивления при установившемся движении.

С учетом (2.11) уравнение (2.10) запишем как

$$F_K R_K = T_{\Delta B} R_K + T_n R_K + M_{Rg} + M_{zg},$$

откуда

$$T_{\Delta B} = F_K - T_n - \frac{M_{Rg} + M_{zg}}{R_K}. \quad (2.12)$$

Воспользовавшись рис.2.4, напомним уравнение проекций на поверхность пути сил, движущих и препятствующих движению МЭС, т.е. уравнение, выражающее тяговый баланс МЭС

$$T_{\Delta B} = F_{nT} + F_{aT} + F_{\text{с}T} + F_{кP}.$$

Подставив в последнее выражение вместо силы $T_{\Delta B}$ его значение из (2.12), получим уравнение тягового баланса в следующем виде

$$F_K - T_n = \frac{M_{Rg} + M_{zg}}{R_K} = F_{nT} + F_{aT} + F_{\text{с}T} + F_{кP}$$

или

$$F_K = \left(\frac{M_{Rg}}{R_K} + T_n + F_{nT} \right) + \left(F_{aT} + \frac{M_{zg}}{R_K} \right) + F_{\text{с}T} + F_{кP}. \quad (2.13)$$

Рассмотрим выражение, стоящее в первых скобках уравнения (2.13). Сопротивление качению гусеничного трактора складывается из двух компонентов: из внутреннего сопротивления гусеничного движителя M_{Rg}/R_K и внешнего сопротивления T_n , возникающего вследствие деформации почвы при передвижении агрегата. Тогда, сила $F_{\text{с}T}$ общего сопротивления качению гусеничного трактора при установившемся движении может быть выражена в виде следующей суммы

$$F_{\text{с}T} = \frac{M_{Rg}}{R_K} + T_n. \quad (2.14)$$

Сопротивление качению пропорционально нагрузке, прижимающей колеса к дороге. Отношение силы $F_{\text{с}T}$ к указанной нагрузке называется коэффициентом сопротивления качению f_r . В общем случае движители МЭС прижимаются к дороге силой $G'_T = G_T \cos \alpha$ в соответствии с чем

$$F_{\text{зТ}} = f_r G_T' = f_r G_T \cos d. \quad (2.15)$$

Просуммировав сопротивление качению $F_{\text{зТ}}$ с сопротивлением подъему $F_{\text{нТ}} = G_T \sin d$ определим общее сопротивление движению, оказываемое грунтом

$$\begin{aligned} F_{\text{зТ}} + F_{\text{нТ}} &= f_r G_T \cos d + G_T \sin d = \\ &= G_T (f_r \cos d + \sin d) = G_T \Psi_T, \end{aligned}$$

где $\Psi_T = f_r \cos d + \sin d$ - приведенный коэффициент сопротивления грунта.

Таким образом,

$$\left(\frac{M_{Rg}}{R_k} + T_n + F_{\text{нТ}} \right) = \Psi_T G_T. \quad (2.16)$$

Выражение, стоящее в уравнении тягового баланса (2.13) во вторых скобках, представляет собой сумму сил, учитывающих инерцию движущихся масс агрегата, и может рассматриваться как результирующая сила инерции

$$F_{\text{атрес}} = F_{\text{ат}} + \frac{M_{\text{жг}}}{R_k}. \quad (2.17)$$

Суммарная сила инерции всех движущихся прямолинейно-поступательно частей может быть подсчитана по формуле

$$F_{\text{ат}} = \frac{G_T}{g} \frac{dv}{dt}, \quad (2.18)$$

где g - ускорение свободного падения; v - поступательная скорость машины.

Приведенный к ведущим колесам момент сил инерции можно представить в следующем виде

$$M_{\text{жг}} = J_g \frac{d\Omega}{dt} i_{\text{тп}} + \sum J_k \frac{d\Omega_k}{dt} i_k + J_g' \frac{d\Omega_g}{dt}, \quad (2.19)$$

где J_g - момент инерции маховика и других движущихся деталей двигателя, приведенный к его коленчатому валу; J_k - моменты инерции отдельных вращающихся деталей трансмиссии, расположен-

ных между ДВС и ведущими колесами, относительно их осей вращения; Ω_K - угловая скорость указанных деталей; i_K - передаточные числа передач, соединяющих рассматриваемую деталь с ведущими колесами; J_g' - суммарный момент инерции гусеничного движителя, приведенный к оси вращения ведущего колеса; $\Omega_{\Sigma g}$ - угловая скорость ведущего колеса.

Выразим угловые ускорения вращающихся деталей через линейное ускорение агрегата

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{d\Omega_{\Sigma g}}{dt} i_{TP} = \frac{d\Omega_{\Sigma g}}{dt} \frac{R_K}{R_K} = \frac{dv}{dt} \frac{i_{TP}}{R_K} \quad (2.20)$$

$$\frac{d\Omega_K}{dt} = \frac{dv}{dt} \frac{i_K}{R_K}, \quad \frac{d\Omega_{\Sigma g}}{dt} = \frac{dv}{dt} \frac{1}{R_K} \quad (2.21)(2.22)$$

Подставив в (2.19) уравнения (2.20), (2.21) и (2.22) получим

$$\begin{aligned} M_{Jg} &= J_g \frac{dv}{dt} \frac{i_{TP}}{R_K} i_{TP} + \sum J_K \frac{dv}{dt} \frac{i_K}{R_K} i_K + J_g' \frac{dv}{dt} \frac{1}{R_K} = \\ &= \frac{J_g i_{TP}^2 + \sum J_K i_K^2 + J_g'}{R_K} \frac{dv}{dt} \end{aligned} \quad (2.23)$$

В свою очередь, подставив (2.19) и (2.23) в уравнение (2.17) будем иметь

$$\begin{aligned} F_{атрес} &= \frac{G_T}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{J_g i_{TP}^2 + \sum J_K i_K^2 + J_g'}{R_K} \frac{dv}{dt} = \\ &= \frac{G_T}{g} \frac{dv}{dt} \left[1 + \frac{g}{G_T} \left(\frac{J_g i_{TP}^2 + \sum J_K i_K^2 + J_g'}{R_K} \right) \right] = F_{ат} \delta_{врт} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Коэффициент

$$\delta_{врт} = 1 + \frac{g}{G_T} \left(\frac{J_g i_{TP}^2 + \sum J_K i_K^2 + J_g'}{R_K} \right), \quad (2.25)$$

отражает влияние, оказываемое на процесс неравномерно-поступательного движения машины ее вращающимися массами, и поэтому называется коэффициентом учета вращающихся масс. Введением коэффициента $\delta_{\theta T}$ вращающиеся части машины условно переводятся к дополнительной поступательно движущейся массе.

Точное определение $\delta_{\theta T}$ затруднительно. Для практических расчетов в теории тракторов применяется следующая эмпирическая формула / 77 /

$$\delta_{\theta T} = 1,15 + 0,001 i_{TP}^2 \quad (2.26)$$

Первый член этой формулы учитывает влияние движителей и вращающихся деталей трансмиссии, непосредственно с ним связанных, второй член - влияние движущихся масс двигателя и остальных вращающихся деталей трансмиссии.

Формула для определения силы сопротивления воздуха имеет следующий вид

$$F_{WT} = K_{WT} S_T v^2, \quad (2.27)$$

где K_{WT} - коэффициент сопротивления воздуха; S_T - площадь лобовой поверхности трактора, т.е. проекция контура трактора на плоскость, перпендикулярную поверхности движения. При малых скоростях движения сила сопротивления воздуха незначительна и ее можно пренебречь.

Сила тягового сопротивления, создаваемая машиной на кривке в соответствии с рис.2.4 равна

$$F_{KP} = T_{PM} + F_{PM} + F_{AM} + F_{WM} + F_P, \quad (2.28)$$

где F_{PM} - сила сопротивления рабочей машины подъему.

Проанализируем каждую из сил сопротивления рабочей машины в отдельности.

Реакция, действующая со стороны поверхности земли на движущиеся колеса, может быть определена из условия, что она должна создавать относительно геометрической оси колес момент, способный вращать эти колеса. Указанное условие можно выразить следующим уравнением

$$T_{PM} R_{KM} = M_{\Delta n} + M_{\gamma n} + M_{RM}, \quad (2.29)$$

где R_{KM} - радиус качения колеса машины; $M_{\xi n}$ - момент сопротивления качению колес; $M_{\eta n}$ - динамический момент сил инерции колес; M_{Rm} - момент сопротивления трения в подшипниках колес.

Пренебрегая M_{Rm} из (2.29) получим

$$T_{nm} = \frac{M_{\xi n}}{R_{KM}} + \frac{M_{\eta n}}{R_{KM}}. \quad (2.30)$$

Подставив (2.30) в (2.28) и сделав группировку членов, получим

$$F_{Kp} = \left(\frac{M_{\xi n}}{R_{KM}} + F_{nm} \right) + \left(F_{am} + \frac{M_{\eta n}}{R_{KM}} \right) + F_{\omega m} + F_p. \quad (2.31)$$

Первую скобку (2.31), представляющую собой общую силу сопротивления, оказываемую поверхностью земли, представим как

$$\frac{M_{\xi n}}{R_{KM}} + F_{nm} = G_m (f_k \cos \alpha + \sin \alpha) = G_m \Psi_m, \quad (2.32)$$

где $\Psi_m = f_k \cos \alpha + \sin \alpha$ - приведенный коэффициент сопротивления поверхности земли рабочей машине.

Вторую скобку (2.32) представляем как результирующую силу инерции машины

$$F_{амртз} = F_{am} + \frac{M_{\eta n}}{R_{KM}} = \frac{G_m}{g} \frac{dv}{dt} \left(1 + \frac{g}{G_m} \frac{J_k}{R_{KM}^2} \right) = F_{am} \delta_{\text{вртм}}, \quad (2.33)$$

где $\delta_{\text{вртм}} = 1 + \frac{g}{G_m} \frac{J_k}{R_{KM}^2}$ - коэффициент учета вращающихся масс машины. В отличие от (2.26) $\delta_{\text{вртм}}$ не содержит члена, зависящего от i_{TP} , поскольку у электрифицированной рабочей машины нет вращающихся частей, механически связанных с первичным двигателем, кроме самих колес.

Силой сопротивления воздуха $F_{\omega m}$ можно пренебречь ввиду его малости.

Силу сопротивления передвижению агрегата рабочего органа машины, осуществляющего технологический процесс, рассчитать в общем виде не представляется возможным, она может быть определена только для конкретного вида машины.

Итак, подставив в (2.13) формулы (2.16), (2.24), (2.32), (2.33) и учтя (2.28), получим

$$F_K = \Psi_T G_T + \delta_{\delta_{PT}} F_{QT} + \Psi_M G_M + \delta_{\delta_{PM}} F_{QM} + F_P. \quad (2.34)$$

Имея ввиду (2.11) и далее подставив в уравнение движения ДВС МЭС (2.9) выражения (2.34), (2.18), (2.33) и сделав преобразования, запишем

$$\begin{aligned} M' - (\Psi_T G_T - \Psi_M G_M + F_P) \frac{R_K}{l_{TP}^2 \varrho_{TP}} - \frac{M_T}{l_{BOM} \varrho_{BOM}} = \\ = \left[\frac{J_T}{l_{BOM}^2} + (\delta_{\delta_{PT}} G_T + \delta_{\delta_{PM}} G_M) \frac{R_K^2}{g l_{TP}^2} \right] \frac{d\Omega}{dt}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Подставив в (2.35) значения Ψ_T и Ψ_M получим окончательное выражение уравнения движения ДВС МЭС

$$\begin{aligned} M' - [(f_T \cos \alpha \pm \sin \alpha) G_T + (f_K \cos \alpha \pm \sin \alpha) G_M + F_P] \frac{R_K}{l_{TP}^2 \varrho_{TP}} - \frac{M_T}{l_{BOM} \varrho_{BOM}} = \\ = \left[\frac{J_T}{l_{BOM}^2} + (\delta_{\delta_{PT}} G_T + \delta_{\delta_{PM}} G_M) \frac{R_K^2}{g l_{TP}^2} \right] \frac{d\Omega}{dt}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Здесь знак плюс перед $\sin \alpha$ - для случая движения на подъем, минус - под уклон.

В случае агрегатирования рабочей машины МЭС на базе колесного трактора (рис.2.5), момент сопротивления ведущих колес запишется как

$$M_{вед} = T_K R_{KB} + \frac{T_n R_{Kn}}{l_{пз}} + M_{R3} + M_{Rn} + M_{г3} + M_{гп}, \quad (2.37)$$

где T_K - толкающая движущая сила задних ведущих колес; T_n - горизонтальная составляющая реакции почвы действующей на передние колеса; R_{KB} и R_{Kn} - соответственно радиусы задних и передних колес; $l_{пз}$ - отношение радиусов передних и задних колес; M_{R3} и M_{Rn} - моменты трения в подшипниках соответственно задних и пе-

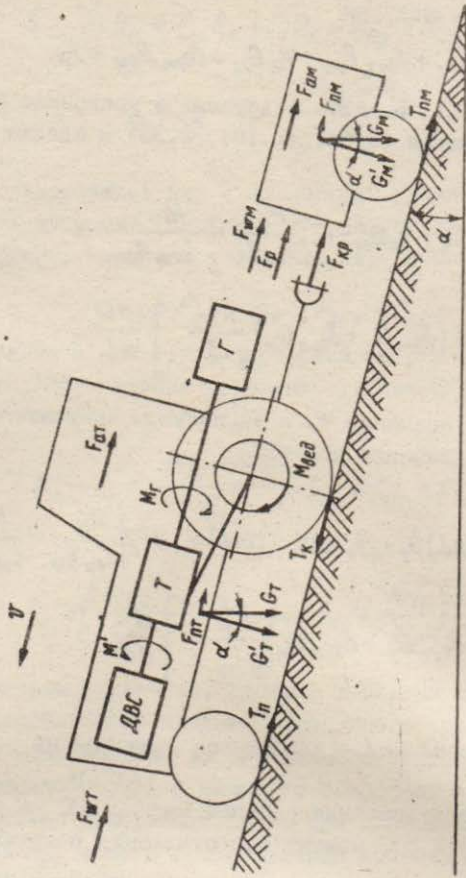


Рис.2.5. Схема сил, действующих на агрегат с колесным трактором в продольной плоскости.

редних колес; $M_{зз}$ и $M_{зп}$ - динамический момент от вращения соответственно задних колес, кинематически с ним связанных деталей трансмиссии и ДВС, и передних колес.

Далее, проведя ряд преобразований, аналогичных преобразованиям при выводе уравнения движения дизеля МЭС на базе гусеничного трактора, получим

$$M' - [(f_k \cos d \pm \sin d)(G_T + G_M) + F_p] \frac{R_{кз}}{i_{TP}^2} - \frac{M_\Gamma}{i_{вон}^2} =$$

$$= \left[\frac{J_\Gamma}{i_{вон}^2} + (\delta_{вот} G_T + \delta_{вон} G_M) \frac{R_{кз}^2}{g i_{TP}^2} \right] \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.38)$$

Как видим, уравнение движения дизеля МЭС на базе колесного трактора мало отличается от уравнения (2.36), что весьма удобно для практических расчетов.

На режим работы ДВС МЭС, следовательно, и силового электрооборудования агрегата, существенное влияние оказывает процесс трогания агрегата с места, когда к ДВС, нагруженному предварительно запущенным автономным электроприводом рабочих органов, посредством муфты сцепления МС подключается трансмиссия трактора, приводящий движители Дв (рис.2.6). При этом на валу ДВС возникает динамический момент, обусловленный массой агрегата и моментом инерции подключаемых к двигателю вращающихся частей, а также момент сопротивления агрегата передвижению.

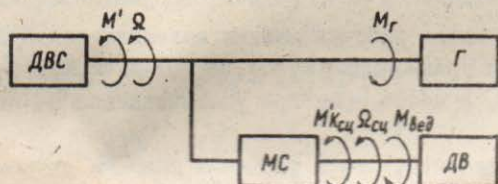


Рис.2.6. Структурная схема трансмиссии трактора с муфтой сцепления.

Считая, что коэффициент сцепления муфты с времени начала его включения t_3 до времени полного включения t_4 изменяется линейно

$$K_{сч} = \frac{t}{t_4 - t_3} - \frac{t_3}{t_4 - t_3}, \quad (2.39)$$

уравнение движения (2.36) ДВС МЭС можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} M' - \frac{M_T}{i_{ВМ} \varphi_{ВМ}} - \left[(f_T \cos \alpha \pm \sin \alpha) G_T + (f_K \cos \alpha \pm \sin \alpha) G_M + F_p \right] x \\ \times \frac{R_{К3} K_{сч}}{l_{Тр} \varphi_{Тр}} = \left[\frac{J_T}{i_{ВМ}^2} + 0,001 G_T \frac{R_{К3}}{g} + (1,15 G_T + \delta_{ВрМ} G_M) \frac{R_{К3} K_{сч}}{g l_{Тр}^2} \right] x \\ \times \frac{d\Omega}{dt} + (1,15 G_T + \delta_{ВрМ} G_M) \frac{R_{К3}^2}{g l_{Тр}^2} \frac{\Omega}{t_4 - t_3} K_{сч}; \end{aligned} \right\} (2.40)$$

$$\begin{aligned} \Omega_{сч} &= K_{сч} \Omega; \\ K_{сч} &= 0 \text{ при } t < t_3; \\ K_{сч} &= \frac{t}{t_4 - t_3} - \frac{t_3}{t_4 - t_3} \text{ при } t_3 \leq t \leq t_4; \\ K_{сч} &= 1 \text{ при } t > t_4. \end{aligned}$$

Данные уравнения позволяют изучить многие режимы системы автономного электропривода, связанные с троганием агрегата с места и воздействием других возмущений на ДВС трактора.

Скорость передвижения агрегата найдем как

$$v = \Omega R_K = \frac{\Omega_{сч}}{l_{Тр}} R_K. \quad (2.41)$$

В случае, когда рабочая машина навешивается непосредственно на МЭС, в уравнениях (2.36), (2.38) и (2.40) G_M становится равным нулю, а масса трактора увеличивается на массу навешенной машины.

Следует отметить, что в расчетах нами не учтены буксование двигателей и потери мощности на буксование. Это вполне допустимо, поскольку электрифицированные машины, как правило, не создают большого тягового сопротивления и величина буксования на основных рабочих режимах трактора невелика, соответственно

несущественны и потери на буксование двигателей. Кроме того, величина буксования нелинейно связана с тяговой нагрузкой трактора, поэтому ее учет привел бы к излишнему усложнению уравнений.

2.2.2. Дифференциальные уравнения синхронного генератора мобильного энергетического средства

В мобильных электрифицированных машинах широко используются наиболее приспособленные для работы в этих условиях синхронные трехфазные генераторы промышленной частоты с самовозбуждением через полупроводниковые выпрямители и снабженные аппаратурой автоматического регулирования напряжения типа ГАВ мощностью до 8 кВт, ЕСС и ЕСС5 мощностью 5...75 кВт и ГОФ мощностью 100...200 кВт / 3, 25, 65 /.

Существующие принципиальные схемы систем возбуждения генераторов приведены на рис.2.7...2.9, они характерны соответственно для генераторов малой (до 8 кВт), средней (до 50 кВт), средней и большой (свыше 50 кВт) мощности / 3, 7, 25 /.

Подробный вывод уравнений рассмотрим на примере генератора типа ЕСС5-82-4 с $P_n = 30$ кВт - одного из наиболее распространенных в сельском хозяйстве (см.рис.2.8) / 37 /. Особенности устройства генератора являются наличие дополнительной обмотки ОД, вложенной в пазы статора совместно с основной обмоткой ОО и служащей для питания системы возбуждения, устройства компаундирования напряжения БКТС и трехфазного двухполупериодного выпрямителя VD в цепи обмотки возбуждения. Ротор генератора не имеет демпфирующей обмотки.

Для описания электромагнитных переходных процессов любого электромеханического преобразователя энергии, необходимо составить уравнения электрического и механического равновесия, а также уравнения преобразования электромагнитной энергии в механическую. При выводе введем следующие допущения: магнитная проницаемость сердечников машины принимается равной бесконечности; распределение полей самоиндукции трехфазных обмоток и взаимоиндукции обмоток статора и ротора вдоль окружности машины считается синусоидальным; магнитопровод и обмотки машины

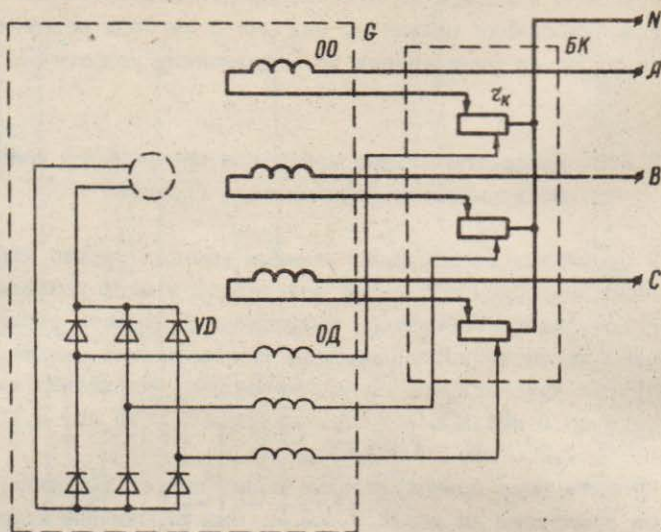


Рис.2.7. Принципиальная электрическая схема генераторов малой мощности типа ГАБ.

симметричны.

Уравнения напряжений основных фазных обмоток статора в общем виде запишем для мгновенных значений так, чтобы активная мощность, отдаваемая этими обмотками, была положительной

$$\left. \begin{aligned} -u_A &= \frac{d\psi_A}{dt} + r_o i_A; \\ -u_B &= \frac{d\psi_B}{dt} + r_o i_B; \\ -u_C &= \frac{d\psi_C}{dt} + r_o i_C, \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

где u_A, u_B, u_C - фазные напряжения на зажимах основных обмоток статора; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, i_A, i_B, i_C$ - потокосцепления и токи основных обмоток; r_o - активное сопротивление фазы основной обмотки.

Для составления уравнений дополнительных обмоток необхо-

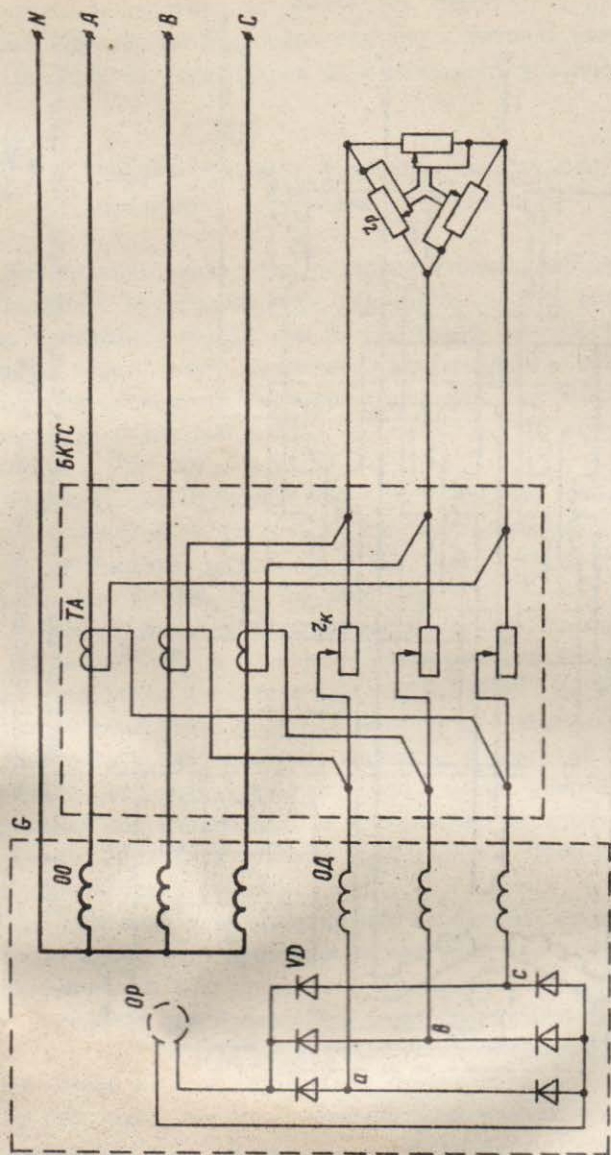


Рис. 2.8. Принципиальная электрическая схема генераторов средней мощности типа ЕСС5.

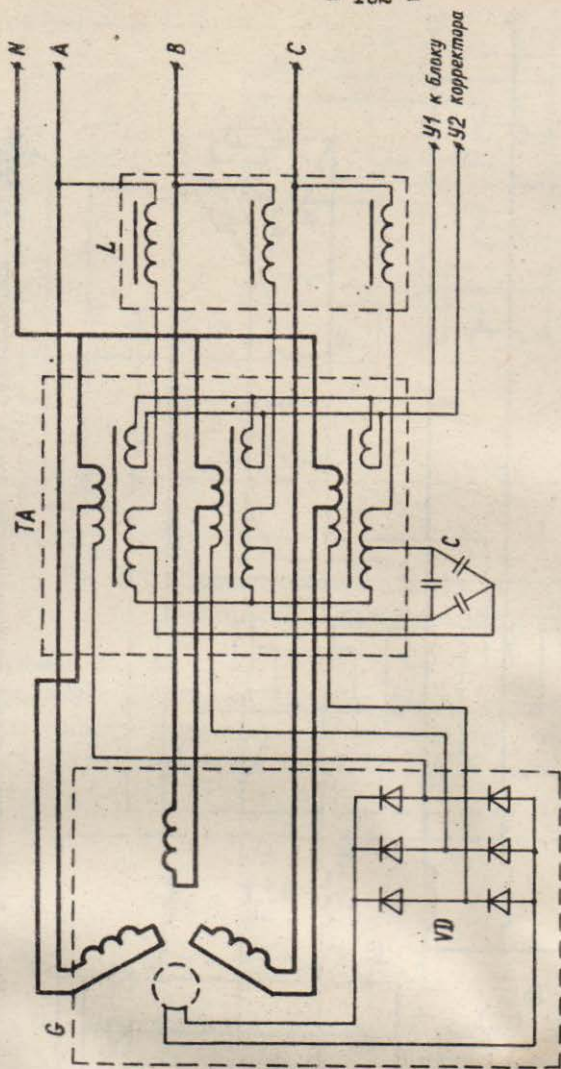


Рис. 2.9. Принципиальная электрическая схема генераторов средней и большой мощности типа ЕСС и ГСФ.

димо описать работу компаундирующего устройства, состоящего из трансформаторов тока и сопротивлений компаундирования и служащего для стабилизации напряжения генератора при изменении тока и коэффициента мощности нагрузки.

Компаундирующее устройство с указанными положительными направлениями токов в ветвях показано на рис.2.10,а. Вторичные обмотки трансформаторов так подключены к компаундирующим сопротивлениям r_K , чтобы их токи были согласны с токами дополнительных обмоток генератора.

Пренебрегая внутренним активным сопротивлением и индуктивностью вторичной обмотки трансформатора тока, ввиду их малости, трансформатор тока заменим идеальным источником тока (рис.2.10,б). При этом должны удовлетворяться условия / 37 /

$$i'_A = -\frac{i_A}{K}; \quad i'_B = -\frac{i_B}{K}; \quad i'_C = -\frac{i_C}{K}, \quad (2.43)$$

где i'_A, i'_B, i'_C - мгновенные значения токов источников; K - коэффициент трансформации трансформатора тока.

Схему можно упростить, заменив источники тока эквивалентными источниками э.д.с. (рис.2.10,в) / 69 /

$$e'_A = r_K i'_A; \quad e'_B = r_K i'_B; \quad e'_C = r_K i'_C,$$

или с учетом (2.43)

$$e'_A = -\frac{r_K}{K} i_A; \quad e'_B = -\frac{r_K}{K} i_B; \quad e'_C = -\frac{r_K}{K} i_C. \quad (2.44)$$

Схема замещения одной фазы дополнительной обмотки генератора приведена на рис.2.11. Схемы замещения других фаз аналогичны. Тогда уравнения напряжения цепи дополнительных обмоток запишутся как

$$\left. \begin{aligned} -u_a &= \frac{d\psi_a}{dt} + r'_g i_a + \frac{r_K}{K} i_B; \\ -u_B &= \frac{d\psi_B}{dt} + r'_g i_B + \frac{r_K}{K} i_C; \\ -u_c &= \frac{d\psi_c}{dt} + r'_g i_c + \frac{r_K}{K} i_A, \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

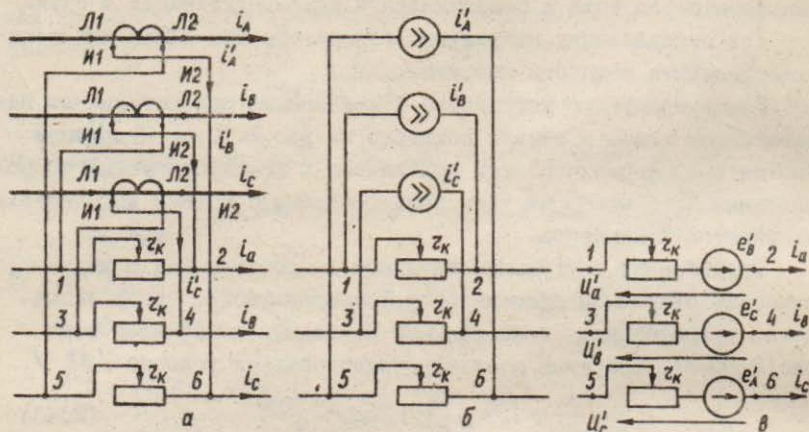


Рис.2.10. Преобразования схемы компаундирующего устройства.

где U_a, U_b, U_c - фазные напряжения на зажимах дополнительных обмоток статора; $\psi_a, \psi_b, \psi_c, i_a, i_b, i_c$ - потокосцепления и токи дополнительных обмоток; $z_g' = z_g + z_k + z_p'$ - суммарное активное сопротивление фазы дополнительной обмотки; z_g - сопротивление фазы дополнительной обмотки; $z_p' = \frac{z_p}{3}$; z_p - сопротивление регуляровочного реостата.

Для обмотки ротора, потребляющей активную мощность, уравнение напряжения будет отличаться знаком левой части

$$u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + z_f i_f, \quad (2.46)$$

где u_f - напряжение, приложенное к зажимам обмотки возбуждения; ψ_f и i_f - потокосцепление и ток обмотки возбуждения; z_f - активное сопротивление обмотки возбуждения.

На основании принятой идеализации машины потокосцепление любой обмотки можно вычислить в виде суммы потокосцеплений самоиндукции и взаимоиндукции со всеми остальными обмотками. Тогда потокосцепления обмоток рассматриваемого синхронного генератора в общем виде представляются выражениями

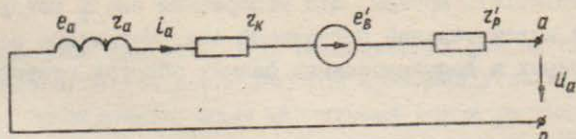


Рис.2.II. Схема замещения фазы дополнительной обмотки.

$$\left. \begin{aligned}
 \psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Aa} i_a + M_{AB} i'_B + M_{AC} i'_C + M_{As} i'_s; \\
 \psi_B &= M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Ba} i_a + M_{BB} i'_B + M_{BC} i'_C + M_{Bs} i'_s; \\
 \psi_C &= M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Ca} i_a + M_{CB} i'_B + M_{CC} i'_C + M_{Cs} i'_s; \\
 \psi_a &= M_{aA} i_A + M_{aB} i_B + M_{aC} i_C + L_a i_a + M_{aB} i'_B + M_{aC} i'_C + M_{as} i'_s; \\
 \psi'_B &= M_{B'A} i_A + M_{B'B} i_B + M_{B'C} i_C + M_{B'a} i_a + L_B i'_B + M_{B'C} i'_C + M_{B's} i'_s; \\
 \psi'_C &= M_{C'A} i_A + M_{C'B} i_B + M_{C'C} i_C + M_{C'a} i_a + M_{C'B} i'_B + L_C i'_C + M_{C's} i'_s; \\
 \psi'_s &= M_{s'A} i_A + M_{s'B} i_B + M_{s'C} i_C + M_{s'a} i_a + M_{s'B} i'_B + M_{s'C} i'_C + L_s i'_s,
 \end{aligned} \right\} (2.47)$$

где L и M — индуктивности и взаимные индуктивности обмоток, принадлежность которых к данной обмотке отмечена принятыми в (2.42), (2.45) и (2.46) буквенными индексами.

Согласно принципу взаимности $M_{AB} = M_{BA}$; $M_{aB} = M_{Ba}$; $M_{Aa} = M_{aA}$ и т.д.

Синхронные генераторы автономного питания, в том числе типа ЕСС5, как правило, выполняются с явнополюсным ротором. Следовательно, в (2.47) и (2.48) постоянной будет только индуктивность обмотки ротора L_f , остальные индуктивности и взаимные индуктивности будут изменяться в зависимости от положения ротора в пространстве.

Положение ротора в пространстве условимся определять углом γ , на который продольная ось ротора отстоит от магнитной

оси фазы А (рис.2.12). Примем, что поперечная ось q ротора отстает на 90° от положительной продольной оси. Магнитные оси одноименных основных и дополнительных фазных обмоток статора совпадают.

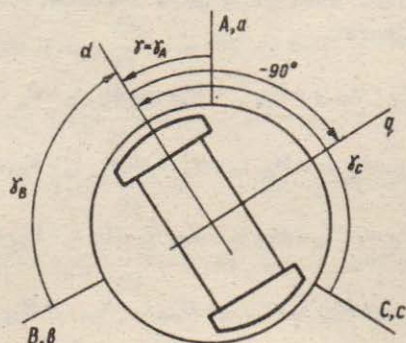


Рис.2.12. К определению индуктивности обмоток статора машины.

Анализ показывает, что индуктивности основных и дополнительных фазных обмоток статора являются периодическими функциями угла между магнитной осью фазы и продольной осью ротора d с периодом, равным π

$$\left. \begin{aligned} L_A &= l_{00} + l_{20} \cos 2\gamma; \\ L_B &= l_{00} + l_{20} \cos(2\gamma + 120^\circ); \\ L_C &= l_{00} + l_{20} \cos(2\gamma - 120^\circ); \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

и

$$\left. \begin{aligned} L_a &= l_{0g} + l_{2g} \cos 2\gamma; \\ L_b &= l_{0g} + l_{2g} \cos(2\gamma + 120^\circ); \\ L_c &= l_{0g} + l_{2g} \cos(2\gamma - 120^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

где l_{00} и l_{0g} - постоянные составляющие индуктивностей основной и дополнительной фазных обмоток; l_{20} и l_{2g} - амплитуды вторых

гармоник индуктивностей основной и дополнительной фазных обмоток.

Взаимные индуктивности разноименных фазных обмоток статора являются четной периодической функцией угла между осью d и линией, проведенной между магнитными осями рассматриваемых фаз. В соответствии с этим взаимные индуктивности между основными фазными обмотками и между дополнительными фазными обмотками статора будут

$$\left. \begin{aligned} M_{AB} &= m_{00} + m_{20} \cos(2\gamma - 120^\circ); \\ M_{AC} &= m_{00} + m_{20} \cos(2\gamma + 120^\circ); \\ M_{BC} &= m_{00} + m_{20} \cos 2\gamma; \end{aligned} \right\} \quad (2.51)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{a\beta} &= m_{0g} + m_{2g} \cos(2\gamma - 120^\circ); \\ M_{ac} &= m_{0g} + m_{2g} \cos(2\gamma + 120^\circ); \\ M_{bc} &= m_{0g} + m_{2g} \cos 2\gamma, \end{aligned} \right\} \quad (2.52)$$

где m_{00} и m_{0g} - постоянные составляющие взаимных индуктивностей основных и дополнительных фазных обмоток статора; m_{20} и m_{2g} - амплитуды вторых гармоник тех же взаимных индуктивностей.

Согласно / 11 / между амплитудами вторых гармоник собственных и взаимных индуктивностей фазных обмоток статора есть простая связь

$$l_{20} = m_{20}, \quad l_{2g} = m_{2g}. \quad (2.53)(2.54)$$

В (2.51) и (2.52) $m_{00} < 0$, $m_{20} > 0$, $m_{0g} < 0$ и $m_{2g} > 0$.

Аналогично найдем взаимные индуктивности между разноименными основными и дополнительными обмотками статора

$$\left. \begin{aligned}
 M_{AB} &= m_{00g} + m_{20g} \cos(2\gamma - 120^\circ); \\
 M_{AC} &= m_{00g} + m_{20g} \cos(2\gamma + 120^\circ); \\
 M_{BC} &= m_{00g} + m_{20g} \cos 2\gamma; \\
 M_{aB} &= m_{00g} + m_{20g} \cos(2\gamma - 120^\circ); \\
 M_{aC} &= m_{00g} + m_{20g} \cos(2\gamma + 120^\circ); \\
 M_{bc} &= m_{00g} + m_{20g} \cos 2\gamma,
 \end{aligned} \right\} \quad (2.55)$$

и одноименными фазными основными и дополнительными обмотками

$$\left. \begin{aligned}
 M_{Aa} &= m_0 + m_2 \cos 2\gamma; \\
 M_{Bb} &= m_0 + m_2 \cos(2\gamma + 120^\circ); \\
 M_{Cc} &= m_0 + m_2 \cos(2\gamma - 120^\circ),
 \end{aligned} \right\} \quad (2.56)$$

где m_{00g} и m_0 - постоянные составляющие взаимных индуктивностей между разноименными и одноименными основными и дополнительными обмотками; m_{20g} и m_2 - амплитуды вторых гармоник тех же взаимных индуктивностей.

Анализ показал, что

$$m_{00g} = m_0, \quad m_{20g} = m_2. \quad (2.57) (2.58)$$

В (2.55) и (2.56) $m_{00g} > 0$, $m_{20g} > 0$, $m_0 > 0$, $m_2 > 0$.

Взаимные индуктивности фазных обмоток статора и обмоток ротора изменяются при вращении ротора по гармоническому закону, достигая наибольшего значения при совпадении магнитных осей рассматриваемых обмоток. Поэтому, взаимные индуктивности между обмоткой возбуждения, ось которой совпадает с осью d , и основными фазными обмотками статора имеют вид

$$\left. \begin{aligned}
 M_{A\delta} &= M_{A\delta d} \cos \gamma; \\
 M_{B\delta} &= M_{B\delta d} \cos(\gamma - 120^\circ); \\
 M_{C\delta} &= M_{C\delta d} \cos(\gamma + 120^\circ),
 \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

где $M_{A\delta d} = M_{B\delta d} = M_{C\delta d}$ - взаимная индуктивность обмотки возбуждения и основной фазной обмотки при совпадении их магнитных осей.

Аналогично запишем взаимоиндуктивности между обмотками возбуждения и дополнительными обмотками статора

$$\left. \begin{aligned} M_{a\delta} &= M_{a\delta d} \cos \gamma ; \\ M_{b\delta} &= M_{b\delta d} \cos (\gamma - 120^\circ) ; \\ M_{c\delta} &= M_{c\delta d} \cos (\gamma + 120^\circ) ; \end{aligned} \right\} \quad (2.60)$$

где $M_{a\delta d} = M_{b\delta d} = M_{c\delta d}$ — взаимная индуктивность обмотки возбуждения и дополнительной фазной обмотки при совпадении их магнитных осей.

Подставив в (2.47) и (2.48) значения индуктивностей из (2.49)...(2.52), (2.55), (2.56), (2.59) и (2.60), получим

$$\left. \begin{aligned} \psi_A &= (\ell_{00} + \ell_{20} \cos 2\gamma) i_A + [m_{00} + m_{20} \cos (2\gamma - 120^\circ)] i_B + \\ &+ [m_{00} + m_{20} \cos (2\gamma + 120^\circ)] i_C + (m_0 + m_2 \cos 2\gamma) i_a + \\ &+ [m_{00\gamma} + m_{20\gamma} \cos (2\gamma - 120^\circ)] i_\gamma + [m_{00\gamma} + m_{20\gamma} \cos (2\gamma + 120^\circ)] i_\delta + \\ &+ M_{A\delta d} \cos \gamma i_\delta ; \\ \psi_B &= [m_{00} + m_{20} \cos (2\gamma - 120^\circ)] i_A + [\ell_{00} + \ell_{20} \cos (2\gamma + 120^\circ)] i_B + \\ &+ (m_0 + m_2 \cos 2\gamma) i_C + [m_{00\gamma} + m_{20\gamma} \cos (2\gamma - 120^\circ)] i_a + \\ &+ [m_0 + m_2 \cos (2\gamma + 120^\circ)] i_B + (m_{00\gamma} + m_{20\gamma} \cos 2\gamma) i_C + \\ &+ M_{B\delta d} \cos (\gamma - 120^\circ) i_\delta ; \\ \psi_C &= [m_{00} + m_{20} \cos (2\gamma + 120^\circ)] i_A + (m_0 + m_2 \cos 2\gamma) i_B + \\ &+ [\ell_{00} + \ell_{20} \cos (2\gamma - 120^\circ)] i_C + [m_{00\gamma} + m_{20\gamma} \cos (2\gamma + 120^\circ)] i_a + \\ &+ (m_{00\gamma} + m_{20\gamma} \cos 2\gamma) i_B + [m_0 + m_2 \cos (2\gamma - 120^\circ)] i_C + \\ &+ M_{C\delta d} \cos (\gamma + 120^\circ) i_\delta ; \\ \psi_a &= (m_0 + m_2 \cos 2\gamma) i_A + [m_{00\gamma} + m_{20\gamma} \cos (2\gamma - 120^\circ)] i_B + \\ &+ [m_{00\gamma} + m_{20\gamma} \cos (2\gamma + 120^\circ)] i_C + (\ell_{0\gamma} + \ell_{2\gamma} \cos 2\gamma) i_a + \\ &+ [m_{0\gamma} + m_{2\gamma} \cos (2\gamma - 120^\circ)] i_B + [m_{0\gamma} + m_{2\gamma} \cos (2\gamma + 120^\circ)] i_C + \\ &+ M_{a\delta d} \cos \gamma i_\delta ; \end{aligned} \right\} \quad (2.61)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \psi_B &= [m_{00g} + m_{20g} \cos(2\gamma - 120^\circ)] i_A + [m_0 + m_2 \cos(2\gamma + 120^\circ)] i_B + \\
 &+ (m_{00g} + m_{20g} \cos 2\delta) i_C + [m_{0g} + m_{2g} \cos(2\gamma - 120^\circ)] i_a + \\
 &+ [l_{0g} + l_{2g} \cos(2\gamma + 120^\circ)] i_g + (m_{0g} + m_{2g} \cos 2\delta) i_c + \\
 &+ M_{B5d} \cos(\gamma - 120^\circ) i_5; \\
 \psi_C &= [m_{00g} + m_{20g} \cos(2\gamma + 120^\circ)] i_A + (m_{00g} + m_{20g} \cos 2\delta) i_B + \\
 &+ [m_0 + m_2 \cos(2\gamma - 120^\circ)] i_C + [m_{0g} + m_{2g} \cos(2\gamma + 120^\circ)] i_a + \\
 &+ (m_{0g} + m_{2g} \cos 2\delta) i_g + [l_{0g} + l_{2g} \cos(2\gamma - 120^\circ)] i_c + \\
 &+ M_{C5d} \cos(\gamma + 120^\circ) i_5;
 \end{aligned} \right\} (2.62)$$

$$\begin{aligned}
 \psi_5 &= M_{A5d} \cos \gamma i_A + M_{B5d} \cos(\gamma - 120^\circ) i_B + \\
 &+ M_{C5d} \cos(\gamma + 120^\circ) i_C + M_{a5d} \cos \gamma i_a + \\
 &+ M_{B5d} \cos(\gamma - 120^\circ) i_g + M_{C5d} \cos(\gamma + 120^\circ) i_c + \\
 &+ L_5 i_5.
 \end{aligned} \quad (2.63)$$

При вращении ротора со скоростью ω , измеряемой в электрических радианах в секунду, к произвольному моменту времени t угол γ составит

$$\gamma = \int \omega dt + \gamma_0. \quad (2.64)$$

где γ_0 - значение γ при $t=0$

Выводы дополнительных обмоток генератора подключаются к трехфазному двухполупериодному выпрямителю, обеспечивающему питание обмотки возбуждения постоянным током. Задача моделирования выпрямителя сводится к определению по фазным токам дополнительной обмотки генератора токов и напряжений в элементах выпрямителя и в обмотке возбуждения.

В соответствии с логикой работы, для симметричной трехфазной системы, электрическое состояние выпрямителя изменяется

через каждые 60° фазы напряжений дополнительной обмотки в определенной последовательности, например, при $30^\circ < \gamma \leq 90^\circ$ и идеальных вентилях схема цепи дополнительных обмоток и обмотки возбуждения выглядит так, как это показано на рис. 2.13/30, 59 /.

Для контура I, показанного на этой схеме, будет справедливо выражение

$$U_f - U_{a\beta} = 0 \text{ или } U_f - U_a + U_\beta = 0,$$

откуда

$$U_f = U_a - U_\beta,$$

также видно, что в данном случае $i_\beta = -i_a, i_c = 0, i_f = i_a$. Аналогично, рассматривая состояние цепи для других значений γ и учтя (2.46), получим

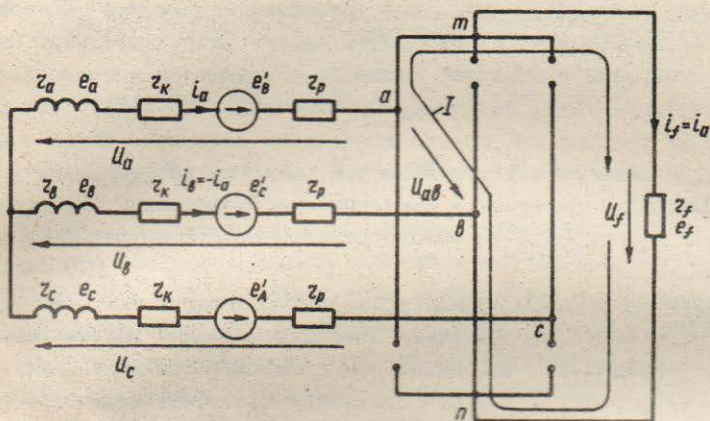


Рис. 2.13. Схема цепи дополнительных обмоток и обмотки возбуждения при $30^\circ < \gamma \leq 90^\circ$.

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{если } 0^\circ \leq \gamma \leq 30^\circ \text{ то } r_s i_c + \frac{d\psi_s}{dt} = U_c - U_B, i_c = -i_B, i_a = 0, i_s = i_c; \\
 &\text{если } 30^\circ < \gamma \leq 90^\circ \text{ то } r_s i_a + \frac{d\psi_s}{dt} = U_a - U_B, i_a = -i_B, i_c = 0, i_s = i_a; \\
 &\text{если } 90^\circ < \gamma \leq 150^\circ \text{ то } r_s i_a + \frac{d\psi_s}{dt} = U_a - U_c, i_a = -i_c, i_B = 0, i_s = i_a; \\
 &\text{если } 150^\circ < \gamma \leq 210^\circ \text{ то } r_s i_B + \frac{d\psi_s}{dt} = U_B - U_c, i_B = -i_c, i_a = 0, i_s = i_B; \\
 &\text{если } 210^\circ < \gamma \leq 270^\circ \text{ то } r_s i_B + \frac{d\psi_s}{dt} = U_B - U_a, i_B = -i_a, i_c = 0, i_s = i_B; \\
 &\text{если } 270^\circ < \gamma \leq 330^\circ \text{ то } r_s i_c + \frac{d\psi_s}{dt} = U_c - U_a, i_c = -i_a, i_B = 0, i_s = i_c; \\
 &\text{если } 330^\circ < \gamma \leq 360^\circ \text{ то } r_s i_c + \frac{d\psi_s}{dt} = U_c - U_B, i_c = -i_B, i_a = 0, i_s = i_c.
 \end{aligned} \right\} (2.65)$$

Выведенные дифференциальные уравнения напряжений обмоток машины (2.45), (2.42), (2.65) решить весьма затруднительно. Они высокого порядка и содержат нелинейные уравнения с периодическими коэффициентами, поскольку потокосцепления (2.61)...(2.63) зависят от времени не только вследствие изменения токов в обмотках, но и за счет индуктивностей, являющихся функциями времени. Поэтому, прибегаем к линейным преобразованиям, которые позволяют существенно упростить дифференциальные уравнения напряжений.

Линейные преобразования уравнений состоят в том, что исходные переменные в уравнениях заменяются новыми переменными, линейно связанными с исходными. По существу, это изменение системы координат, в которых производится отсчет величин — переход от трех исходных осей (а, в, с) к двум (х, у). Физически это означает замену трехфазной машины двухфазной, в которой магнитные оси фазных обмоток сдвинуты на 90° Эл /12, 17, 24, 43, 51, 55, 67, 73/.

В соответствии с современной теорией электрических машин переходные процессы в синхронной машине целесообразно исследо-

вать в системе координат, вращающихся вместе с ротором, где имеет место магнитная или электрическая несимметрия. Ось X при этом совмещает \hat{c} продольной осью ротора — это так называемая система осей d, q . Преобразование к осям d, q является практически единственным, приводящим дифференциальные уравнения синхронной машины с периодическими коэффициентами к уравнениям с постоянными коэффициентами.

Замену исходных переменных, например, i_a, i_b, i_c в осях a, b, c на новые переменные в осях d, q производим по уравнениям

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} [i_a \cos \gamma + i_b \cos(\gamma - 120^\circ) + i_c \cos(\gamma + 120^\circ)]; \\ i_q &= \frac{2}{3} [i_a \sin \gamma + i_b \sin(\gamma - 120^\circ) + i_c \sin(\gamma + 120^\circ)]; \\ i_o &= \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c), \end{aligned} \right\} \quad (2.66)$$

где i_d и i_q — продольный и поперечный токи в осях d, q ; i_o — нулевая составляющая тока. Для трехфазных обмоток, соединенных в звезду с изолированной нейтральной точкой, и симметричной трехфазной системы $i_o = 0$, поэтому в дальнейших расчетах i_o во внимание не берем.

Обратные соотношения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma; \\ i_b &= i_d \cos(\gamma - 120^\circ) + i_q \sin(\gamma - 120^\circ); \\ i_c &= i_d \cos(\gamma + 120^\circ) + i_q \sin(\gamma + 120^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (2.67)$$

Преобразование исходных уравнений к осям d, q производим с помощью формул линейного преобразования (2.66). Подставив в одно из уравнений системы (2.42), например, в первое, вместо i_a, u_a, ψ_a однотипные выражения вида первого уравнения системы (2.66), выполнив дифференцирование и необходимые преобразования, получим

$$\left. \begin{aligned} -U_{d0} &= \frac{d\psi_{d0}}{dt} + \omega \psi_{q0} + r_0 i_{d0}; \\ -U_{q0} &= \frac{d\psi_{q0}}{dt} - \omega \psi_{d0} + r_0 i_{q0}, \end{aligned} \right\} \quad (2.68)$$

где U_{d0} и U_{q0} , ψ_{d0} и ψ_{q0} , i_{d0} и i_{q0} - соответственно продольные и поперечные составляющие напряжения, потокосцепления и тока основной обмотки.

Аналогично преобразуем уравнения напряжений дополнительной обмотки статора (2.45)

$$\left. \begin{aligned} -U_{dg} &= \frac{d\psi_{dg}}{dt} + \omega\psi_{qg} + r'_g i_{dg} - \frac{r_K}{2K} (i_{d0} + \sqrt{3} i_{q0}); \\ -U_{qg} &= \frac{d\psi_{qg}}{dt} - \omega\psi_{dg} + r'_g i_{qg} + \frac{r_K}{2K} (\sqrt{3} i_{d0} - i_{q0}), \end{aligned} \right\} \quad (2.69)$$

где U_{dg} и U_{qg} , ψ_{dg} и ψ_{qg} , i_{dg} и i_{qg} - соответственно продольные и поперечные составляющие напряжения, потокосцепления и тока дополнительной обмотки.

Цепь обмотки возбуждения целесообразно рассчитывать по (2.65), поскольку записать эти уравнения в системе d, q в явном виде не представляется возможным. Здесь фазные напряжения находим путем обратных преобразований (2.67)

$$\left. \begin{aligned} U_a &= U_{dg} \cos \delta + U_{qg} \sin \delta; \\ U_b &= U_{dg} \cos(\delta - 120^\circ) + U_{qg} \sin(\delta - 120^\circ); \\ U_c &= U_{dg} \cos(\delta + 120^\circ) + U_{qg} \sin(\delta + 120^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (2.70)$$

Произведя линейные преобразования над фазными потокосцеплениями (2.61) и (2.62) основных и дополнительных обмоток, после тригонометрических преобразований, найдем

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d0} &= L_{d0} i_{d0} + M_{d0m} i_{dg} + M_{Adm} i_s; \\ \psi_{q0} &= L_{q0} i_{q0} + M_{q0} i_{qg}; \\ \psi_{dg} &= M_{d0m} i_{d0} + L_{dg} i_{dg} + M_{Adm} i_s; \\ \psi_{qg} &= M_{q0} i_{q0} + L_{qg} i_{qg}, \end{aligned} \right\} \quad (2.71)$$

где $L_{d0} = L_{00} - m_{00} - \frac{3}{2} L_{20}$; $M_{d0M} = M_{d0gM} = m_0 + m_{00g} + \frac{3}{2} m_2$;

$L_{q0} = L_{00} - m_{00} - \frac{3}{2} L_{20}$; $M_{q0} = M_{q0g} = m_0 + m_{00g} - \frac{3}{2} m_2$; $L_{dg} = L_{0g} -$

$- m_{0g} + \frac{3}{2} L_{2g}$; $L_{qg} = L_{0g} - m_{0g} - \frac{3}{2} L_{2g}$.

Введя в (2.63) продольный и поперечный токи статора, согласно (2.66), получим

$$\Psi_s = \frac{3}{2} (M_{AdM} i_{d0} + M_{AdM} i_{dg}) + L_s i_s. \quad (2.72)$$

Электромагнитный момент является инвариантным или не изменяет своего значения при переходе от одной системы координат к другой. Тогда из известного выражения / 61 /

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p_n \Psi_m I_m \cos \psi,$$

путем преобразований получим

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p_n (\Psi_{d0} i_{q0} - \Psi_{q0} i_{d0} + \Psi_{dg} i_{qg} - \Psi_{qg} i_{dg}), \quad (2.73)$$

где p_n - число пар полюсов генератора; Ψ_m - максимальное потоко-сцепление с фазной обмоткой; I_m - амплитуда фазного тока; ψ - фазовый пространственный угол сдвига первых гармоник индукции B_g и линейной нагрузки.

Полученные уравнения (2.65), (2.68)...(2.73) существенно проще исходных и не содержат переменных коэффициентов за исключением систем (2.65) и (2.70). Уравнения позволяют с высокой точностью моделировать переходные процессы в генераторах типа БСС5 со стандартной системой самовозбуждения и рассчитывать все режимы работы системы автономного электропривода.

Остановимся на особенностях моделирования переходных процессов в других типах генераторов.

Схема одной фазы генератора ГАБ-4-Т/230 приведена на рис. 2.14. На схеме сопротивление компаундирования \mathcal{Z}_K (см. рис. 2.7) представлено в виде двух сопротивлений - регулирования тока возбуждения \mathcal{Z}_1 и компаундирования напряжения \mathcal{Z}_2 .

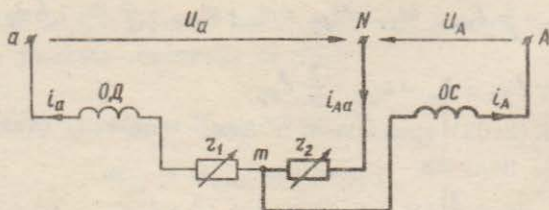


Рис.2.14. Схема одной фазы генератора ГАБ-4-Т/230.

Составим уравнения по первому закону Кирхгофа для узла "m" фазы А и аналогичных узлов других фаз

$$\left. \begin{aligned} i_{Aa} - i_A - i_a &= 0; \\ i_{Bb} - i_B - i_b &= 0; \\ i_{Cc} - i_C - i_c &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.74)$$

где i_{Aa}, i_{Bb}, i_{Cc} - токи в неразветвленной части фаз.

Уравнения напряжений цепи основных фазных обмоток

$$\left. \begin{aligned} -U_A &= \frac{d\psi_A}{dt} + r_o i_A + r_2 i_{Aa}; \\ -U_B &= \frac{d\psi_B}{dt} + r_o i_B + r_2 i_{Bb}; \\ -U_C &= \frac{d\psi_C}{dt} + r_o i_C + r_2 i_{Cc}. \end{aligned} \right\} \quad (2.75)$$

Аналогично запишем уравнения для цепи дополнительных обмоток

$$\left. \begin{aligned} -U_a &= \frac{d\psi_a}{dt} + r_g i_a + r_1 i_a + r_2 i_{Aa}; \\ -U_b &= \frac{d\psi_b}{dt} + r_g i_b + r_1 i_b + r_2 i_{Bb}; \\ -U_c &= \frac{d\psi_c}{dt} + r_g i_c + r_1 i_c + r_2 i_{Cc}. \end{aligned} \right\} \quad (2.76)$$

Потокосцепления обмоток генератора, записанные в общем виде, аналогичны (2.47). Но в данном случае, с целью обеспечения фазового компаундирования дополнительная обмотка генератора сдвинута на 90° относительно основной обмотки, что приводит к изменению выражений для индуктивностей дополнительной обмотки

и части взаимноиндуктивностей между обмотками. В частности, индуктивности дополнительных фазных обмоток запишутся как

$$\left. \begin{aligned} L_a &= l_{0g} + l_{2g} \cos(2\gamma + 180^\circ); \\ L_b &= l_{0g} + l_{2g} \cos(2\gamma - 60^\circ); \\ L_c &= l_{0g} + l_{2g} \cos(2\gamma + 60^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (2.77)$$

Взаимоиндуктивности между дополнительными фазными обмотками

$$\left. \begin{aligned} M_{ab} &= m_{0g} + m_{2g} \cos(2\gamma + 60^\circ); \\ M_{ac} &= m_{0g} + m_{2g} \cos(2\gamma - 60^\circ); \\ M_{bc} &= m_{0g} + m_{2g} \cos(2\gamma - 180^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (2.78)$$

Взаимоиндуктивности между разноименными основными и дополнительными обмотками

$$\left. \begin{aligned} M_{AB} &= m_{01} + m_{21} \cos(2\gamma - 30^\circ); \\ M_{Bc} &= m_{01} + m_{21} \cos(2\gamma + 90^\circ); \\ M_{Ca} &= m_{01} + m_{21} \cos(2\gamma - 150^\circ); \\ M_{Ba} &= m_{02} + m_{22} \cos(2\gamma - 30^\circ); \\ M_{Cb} &= m_{02} + m_{22} \cos(2\gamma + 90^\circ); \\ M_{Ac} &= m_{02} + m_{22} \cos(2\gamma - 150^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (2.79)$$

где m_{01} , m_{02} - постоянные составляющие взаимноиндуктивностей;
 m_{21} , m_{22} - амплитуда вторых гармоник взаимноиндуктивностей.

Анализ показывает, что

$$m_{01} > 0, m_{02} < 0, m_{21} > 0, m_{22} > 0 \text{ и } |m_{01}| = |m_{02}|, m_{21} = m_{22}.$$

Между одноименными фазными основными и дополнительными обмотками, магнитные оси которых перпендикулярны, взаимноиндуктивность практически отсутствует

$$M_{Aa} = M_{Bb} = M_{Cc} = 0.$$

Взаимоиндуктивности между обмоткой возбуждения и дополнительными фазными обмотками статора

$$\left. \begin{aligned} M_{a\zeta} &= M_{a\zeta d} \cos(\delta + 90^\circ); \\ M_{b\zeta} &= M_{a\zeta d} \cos(\delta - 30^\circ); \\ M_{c\zeta} &= M_{a\zeta d} \cos(\delta - 150^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (2.80)$$

Воспользовавшись (2.66), произведем линейные преобразования (2.74)...(2.76)

$$\left. \begin{aligned} i_{d0g} - i_{d0} - i_{dg} &= 0; \\ i_{q0g} - i_{q0} - i_{qg} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (2.81)$$

$$\left. \begin{aligned} -U_{d0} &= \frac{d\psi_{d0}}{dt} + \omega\psi_{q0} + r_0 i_{d0} + r_2 i_{d0g}; \\ -U_{q0} &= \frac{d\psi_{q0}}{dt} - \omega\psi_{d0} + r_0 i_{q0} + r_2 i_{q0g}; \\ -U_{dg} &= \frac{d\psi_{dg}}{dt} + \omega\psi_{qg} + (r_g + r_1) i_{dg} + r_2 i_{d0g}; \\ -U_{qg} &= \frac{d\psi_{qg}}{dt} - \omega\psi_{dg} + (r_g + r_1) i_{qg} + r_2 i_{q0g}, \end{aligned} \right\} \quad (2.82)$$

где i_{d0g} , i_{q0g} - продольный и поперечный составляющие тока в неразветвленной части фаз генератора.

Потокосцепления в системе координат d, q будут

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d0} &= L_{d0} i_{d0} + M_{d0m} i_{qg} + M_{adm} i_s; \\ \psi_{q0} &= L_{q0} i_{q0} + M_{q0} i_{dg}; \\ \psi_{dg} &= M_{dg} i_{q0} + L_{dg} i_{dg}; \\ \psi_{qg} &= M_{qg} i_{d0} + M_{qg2} i_{dg} + L_{qg} i_{qg} + M_{adm} i_s, \end{aligned} \right\} \quad (2.83)$$

где $L_{d0} = L_{00} - m_{00} + \frac{3}{2} L_{20}$; $M_{d0m} = m_{21} - \sqrt{3} m_{01}$; $L_{q0} = L_{00} - m_{00} - \frac{3}{2} L_{20}$;

$M_{g0} = -(m_{01} + m_{21})$; $M_{dg} = m_{21}$; $L_{dg} = L_{0g} - m_{0g} - m_{2g} - \frac{1}{2} L_{2g}$;

$M_{gg1} = -m_{21}$; $M_{gg2} = -m_{0g}$; $L_{gg} = L_{0g} + m_{2g} + \frac{1}{2} L_{2g}$.

Другие уравнения аналогичны ранее выведенным для генератора типа ЕСС5-82-4.

Рассмотрим дифференциальные уравнения генератора типа ЕСС-82-4У2, схема одной фазы которого показана на рис.2.15.

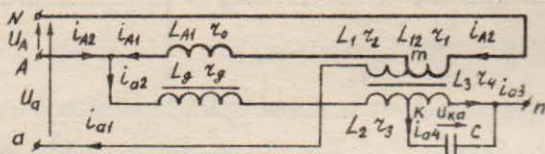


Рис.2.15. Схема одной фазы генератора типа ЕСС-82-4У2.

Трансформаторы ТА (см.рис.2.9) обладают независимыми магнитными системами. При работе генератора под нагрузкой по обмотке L_{12} трансформатора протекает ток и во вторичной обмотке L_2 трансформатора появляется дополнительный ток, который обеспечивает требуемый характер изменения тока возбуждения в зависимости от величины и фазы тока генератора. При расчетах полагаем, что $m = const$.

Составим возможное число уравнений по первому закону Кирхгофа. Для узлов "m" и "K" фазы А и аналогичных узлов фаз В и С запишем

$$\left. \begin{aligned} i_{A2} - i_{A1} - i_{a1} &= 0; \\ i_{B2} - i_{B1} - i_{b1} &= 0; \\ i_{C2} - i_{C1} - i_{c1} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (2.84)$$

и

$$\left. \begin{aligned} i_{a2} - i_{a3} - i_{a4} &= 0; \\ i_{b2} - i_{b3} - i_{b4} &= 0; \\ i_{c2} - i_{c3} - i_{c4} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.85)$$

где $i_{A1}, i_{A2}, i_{A1}, i_{A2}, i_{A3}, i_{A4}$ - токи в фазных обмотках "А" генератора и трансформатора. Здесь и далее величины, относящиеся к другим фазам имеют индексы "В", "в" и "С", "с".

Уравнения для цепи основной обмотки составим по второму закону Кирхгофа, пренебрегая активным сопротивлением обмоток трансформатора тока $r_{A2} = 0$, $r_{a1} = 0$ и учтя, что потенциалы точек N и n равны $\varphi_N = \varphi_n$

$$\left. \begin{aligned} -U_A &= \frac{d\psi_{A1}}{dt} + \frac{d\psi_{A2}}{dt} + r_0 i_{A1}; \\ -U_B &= \frac{d\psi_{B1}}{dt} + \frac{d\psi_{B2}}{dt} + r_0 i_{B1}; \\ -U_C &= \frac{d\psi_{C1}}{dt} + \frac{d\psi_{C2}}{dt} + r_0 i_{C1}, \end{aligned} \right\} (2.86)$$

для цепи дросселя вторичной обмотки трансформатора получим

$$\left. \begin{aligned} -U_A &= \frac{d\psi_{g1}}{dt} + \frac{d\psi_{a2}}{dt} + \frac{d\psi_{a3}}{dt} + (r_g + r_3) i_{a2} + r_4 i_{a3}; \\ -U_B &= \frac{d\psi_{g2}}{dt} + \frac{d\psi_{a2}}{dt} + \frac{d\psi_{a3}}{dt} + (r_g + r_3) i_{a2} + r_4 i_{a3}; \\ -U_C &= \frac{d\psi_{g3}}{dt} + \frac{d\psi_{c2}}{dt} + \frac{d\psi_{c3}}{dt} + (r_g + r_3) i_{c2} + r_4 i_{c3}, \end{aligned} \right\} (2.87)$$

для контура конденсатора

$$\left. \begin{aligned} 0 &= \frac{d\psi_{a3}}{dt} - U_{ka} + r_4 i_{a3}; \\ 0 &= \frac{d\psi_{c3}}{dt} - U_{kc} + r_4 i_{c3}; \\ 0 &= \frac{d\psi_{c3}}{dt} - U_{kc} + r_4 i_{c3}, \end{aligned} \right\} (2.88)$$

для цепи питания обмотки возбуждения

$$\left. \begin{aligned} -U_a &= \frac{d\psi_{a1}}{dt} + \frac{d\psi_{A2}}{dt}; \\ -U_b &= \frac{d\psi_{b1}}{dt} + \frac{d\psi_{B2}}{dt}; \\ -U_c &= \frac{d\psi_{c1}}{dt} + \frac{d\psi_{C2}}{dt}, \end{aligned} \right\} (2.89)$$

где $\psi_{A1}, \psi_{A2}, \psi_{g1}, \psi_{a1}, \psi_{a2}, \psi_{a3}$ - полные потокоцепления фазных обмоток генератора, дросселя и трансформатора; U_A, U_a, U_{ka} - фазные напряжения обмотки генератора, цепи питания обмотки возбуждения и напряжения на конденсаторе; r_0, r_g, r_3, r_4 - активные со-

противления фазной обмотки генератора, дросселя и обмоток трансформатора.

Выражения для потокоцеплений имеют вид

$$\left. \begin{aligned}
 \Psi_{A1} &= L_{A1} i_{A1} + M_{AB1} i_{B1} + M_{AC1} i_{C1} + M_{A\delta} i_{\delta} ; \\
 \Psi_{B1} &= M_{BA1} i_{A1} + L_{B1} i_{B1} + M_{BC1} i_{C1} + M_{B\delta} i_{\delta} ; \\
 \Psi_{C1} &= M_{CA1} i_{A1} + M_{CB1} i_{B1} + L_{C1} i_{C1} + M_{C\delta} i_{\delta} ; \\
 \\
 \Psi_{A2} &= L_{12} i_{A2} + M_{AB2} i_{B1} + M_{A\delta 2} i_{A2} + M_{A\delta 2} i_{A2} ; \\
 \Psi_{B2} &= L_{12} i_{B2} + M_{B\delta 2} i_{B1} + M_{B\delta 2} i_{B2} + M_{B\delta 2} i_{B2} ; \\
 \Psi_{C2} &= L_{12} i_{C2} + M_{C\delta 2} i_{C1} + M_{C\delta 2} i_{C2} + M_{C\delta 2} i_{C2} ; \\
 \\
 \Psi_{A\delta} &= L_{\delta} i_{A\delta} ; \\
 \Psi_{B\delta} &= L_{\delta} i_{B\delta} ; \\
 \Psi_{C\delta} &= L_{\delta} i_{C\delta} ; \\
 \\
 \Psi_{a1} &= L_1 i_{a1} + M_{1a2} i_{a2} + M_{a1\delta} i_{a\delta} + M_{a1\delta} i_{a\delta} ; \\
 \Psi_{b1} &= L_1 i_{b1} + M_{1b2} i_{b2} + M_{b1\delta} i_{b\delta} + M_{b1\delta} i_{b\delta} ; \\
 \Psi_{c1} &= L_1 i_{c1} + M_{1c2} i_{c2} + M_{c1\delta} i_{c\delta} + M_{c1\delta} i_{c\delta} ; \\
 \\
 \Psi_{a2} &= L_2 i_{a2} + M_{2a2} i_{a2} + M_{a2\delta} i_{a1} + M_{a2\delta} i_{a2} ; \\
 \Psi_{b2} &= L_2 i_{b2} + M_{2b2} i_{b2} + M_{b2\delta} i_{b1} + M_{b2\delta} i_{b2} ; \\
 \Psi_{c2} &= L_2 i_{c2} + M_{2c2} i_{c2} + M_{c2\delta} i_{c1} + M_{c2\delta} i_{c2} ; \\
 \\
 \Psi_{a\delta} &= L_3 i_{a\delta} + M_{3a2} i_{a2} + M_{a\delta 1} i_{a1} + M_{a\delta 2} i_{a2} ; \\
 \Psi_{b\delta} &= L_3 i_{b\delta} + M_{3b2} i_{b2} + M_{b\delta 1} i_{b1} + M_{b\delta 2} i_{b2} ; \\
 \Psi_{c\delta} &= L_3 i_{c\delta} + M_{3c2} i_{c2} + M_{c\delta 1} i_{c1} + M_{c\delta 2} i_{c2} ,
 \end{aligned} \right\} (2.90)$$

где L_{A1}, L_g - индуктивности фазной обмотки генератора и дросселя;
 L_{12}, L_1, L_2, L_3 - индуктивности обмоток трансформатора; M_{AM}, M_{MC} - взаи-
 моиндуктивности фазных обмоток генератора; M_{A5} - взаимоиנדуктив-
 ность фазной обмотки и обмотки возбуждения генератора; $M_{A21} =$

$$= M_{iA2} = M_{i21}, M_{A22} = M_{2A2} = M_{i22}, M_{A23} = M_{3A2} = M_{i23}, M_{A12} = M_{A21} = M_{i12},$$

$M_{A15} = M_{A51} = M_{i15}, M_{A23} = M_{A32} = M_{i23}$ - взаимоиנדуктивности обмоток транс-
 форматора.

Произведем линейные преобразования систем (2.84)...(2.89),
 получим

$$\left. \begin{aligned} i_{d12} - i_{d11} - i_{d1} &= 0 ; \\ i_{q12} - i_{q11} - i_{q1} &= 0 ; \\ i_{d2} - i_{d5} - i_{d4} &= 0 ; \\ i_{q2} - i_{q3} - i_{q4} &= 0 ; \\ -U_{d1} &= \frac{d\psi_{d11}}{dt} + \frac{d\psi_{d12}}{dt} + \omega\psi_{q1} + \omega\psi_{q12} + r_1 i_{d1} ; \\ -U_{q1} &= \frac{d\psi_{q11}}{dt} + \frac{d\psi_{q12}}{dt} - \omega\psi_{d1} - \omega\psi_{d12} + r_1 i_{q1} ; \\ -U_{d1} &= \frac{d\psi_{d3}}{dt} + \frac{d\psi_{d2}}{dt} + \frac{d\psi_{d5}}{dt} + \omega\psi_{q3} + \omega\psi_{q2} + \\ &\quad + \omega\psi_{q5} + (r_3 + r_2) i_{d2} + r_5 i_{d5} ; \\ U_{q1} &= \frac{d\psi_{q2}}{dt} + \frac{d\psi_{q2}}{dt} + \frac{d\psi_{q5}}{dt} - \omega\psi_{d3} - \omega\psi_{d2} - \\ &\quad - \omega\psi_{d5} + (r_3 + r_2) i_{q2} + r_5 i_{q5} ; \\ 0 &= \frac{d\psi_{d3}}{dt} + \omega\psi_{q3} - \frac{1}{C_2} \int i_{d4} dt + r_5 i_{d5} ; \\ 0 &= \frac{d\psi_{q2}}{dt} - \omega\psi_{d3} - \frac{1}{C_2} \int i_{q4} dt + r_5 i_{q5} ; \\ -U_{d2} &= \frac{d\psi_{d1}}{dt} + \frac{d\psi_{d12}}{dt} + \omega\psi_{q1} + \omega\psi_{q12} ; \\ -U_{q2} &= \frac{d\psi_{q1}}{dt} + \frac{d\psi_{q12}}{dt} - \omega\psi_{d1} - \omega\psi_{d12} , \end{aligned} \right\} (2.9E)$$

где $i_{dH}, i_{qH}, i_{d12}, i_{q12}, i_{d1}, i_{q1}, i_{d2}, i_{q2}, i_{d3}, i_{q3}, i_{d4}, i_{q4}$ — продольные и поперечные составляющие трехфазных токов с токами фазы "А", соответственно $i_{A1}, i_{A2}, i_{A1}, i_{A2}, i_{A3}, i_{A4}$; $\Psi_{dH}, \Psi_{qH}, \Psi_{d12}, \Psi_{q12}, \Psi_{d1}, \Psi_{q1}, \Psi_{d2}, \Psi_{q2}, \Psi_{d3}, \Psi_{q3}$ — продольные и поперечные составляющие трехфазных потокоцеплений с потокоцеплениями фазы "А" соответственно $\Psi_{A1}, \Psi_{A2}, \Psi_{A3}, \Psi_{A1}, \Psi_{A2}, \Psi_{A3}$; $U_{d1}, U_{q1}, U_{d2}, U_{q2}$ — продольные и поперечные составляющие напряжений обмоток генератора и цепи питания обмотки возбуждения; $C_3 = 3C_1$ — емкость конденсатора после преобразования схемы его соединения из треугольника в звезду.

Значения потокоцеплений по осям d, q

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{dH} &= L_{dH} i_{d1} + M_{15d} i_s ; \\ \Psi_{qH} &= L_{qH} i_{q1} ; \\ \Psi_{d12} &= L_{12} i_{d12} + M_{121} i_{d1} + M_{122} i_{d2} + M_{123} i_{d3} ; \\ \Psi_{q12} &= L_{12} i_{q12} + M_{121} i_{q1} + M_{122} i_{q2} + M_{123} i_{q3} ; \\ \Psi_{d1} &= L_1 i_{d1} + M_{121} i_{d12} + M_{12} i_{d2} + M_{15} i_{d3} ; \\ \Psi_{q1} &= L_1 i_{q1} + M_{121} i_{q12} + M_{12} i_{q2} + M_{15} i_{q3} ; \\ \Psi_{d2} &= L_2 i_{d2} + M_{122} i_{d12} + M_{12} i_{d1} + M_{25} i_{d3} ; \\ \Psi_{q2} &= L_2 i_{q2} + M_{122} i_{q12} + M_{12} i_{q1} + M_{25} i_{q3} ; \\ \Psi_{d3} &= L_3 i_{d3} + M_{123} i_{d12} + M_{15} i_{d1} + M_{25} i_{d2} ; \\ \Psi_{q3} &= L_3 i_{q3} + M_{123} i_{q12} + M_{15} i_{q1} + M_{25} i_{q2} , \end{aligned} \right\} (2.92)$$

где i_s — ток возбуждения; L_{dH}, L_{qH} — индуктивности фазных обмоток генератора по осям d, q ; M_{15d} — взаимная индуктивность обмотки возбуждения и фазной обмотки генератора при совпадении их магнитных осей.

Потокоцепление обмотки возбуждения в данном случае запишется как

$$\Psi_s = \frac{3}{2} M_{15d} i_{d1} + L_s i_s, \quad (2.93)$$

электромагнитный момент генератора

$$M_{эм} = \frac{3}{2} P_n (\Psi_{dH} i_{g1} - \Psi_{qH} i_{d1}). \quad (2.94)$$

Уравнения цепи возбуждения с учетом выпрямителя остаются без изменения.

Вышеприведенные уравнения синхронных генераторов, в соответствии с принятыми допущениями, не учитывают насыщения магнитной цепи машины, что приводит к существенным погрешностям при расчетах некоторых режимов работы.

Необходимость учета насыщения магнитной цепи по пути основного магнитного потока возникает при исследовании форсировки возбуждения синхронного генератора, регулирования напряжения на зажимах по определенному закону, поддержании неизменным напряжения при переменной частоте вращения ротора и некоторых других режимах. При этом насыщение определяется напряжением на выходе генератора и приводит, в основном, к уменьшению взаимной индуктивности.

Насыщение участков магнитной цепи потоками рассеяния учитывают при моделировании внезапных коротких замыканий синхронных машин, во время которого значительная часть магнитного потока устремляется по путям потоков рассеяния.

Таким образом, для исследуемых режимов работы системы автономного электрпривода достаточно учесть насыщение магнитной цепи синхронного генератора по пути основного магнитного потока. Причем, при моделировании явнополюсных машин насыщение магнитной цепи обычно учитывают только для продольной оси.

Степень насыщения магнитной цепи синхронной машины определяется величиной результирующей продольной м. д. с. в воздушном зазоре, пропорциональной величине результирующего тока по продольной оси i_{dM} , которым соответствуют результирующее продольное потокосцепление в воздушном зазоре и пропорциональная ему при номинальной скорости э. д. с. Тогда зависимость индуктивности от результирующего продольного тока $M_{dM}(i_{dM})$ можно получить из характеристики холостого хода машины $E_{эм}(i_f) / 59$ /. Для этого по экспериментально снятой характеристике холостого хода (рис. 2.16), строим зависимость коэффициента насыщения магнитной це-

пи, определяемого как отношение э.д.с. найденного из спрямленной характеристики холостого хода, к э.д.с. из действительной характеристики, от тока возбуждения $K_{\text{мг}}(i_d)$. Например, для точки соответствующей номинальному напряжению

$$K_{\text{мг}} = \frac{AC}{AB}.$$

Далее, взаимоиנדуктивности между обмотками машины по продольной оси находим как

$$M_{d\text{м}} = \frac{M_d}{K_{\text{мг}}},$$

где M_d - значения взаимоиנדуктивностей для ненасыщенной магнитной системы.

Следует отметить, что в общем случае

$$i_{d\text{м}} = i_{d0} + i_{d\text{г}} + i_s. \quad (2.95)$$

На рис. 2.16 показаны графики коэффициента насыщения магнитной цепи $K_{\text{м}}$, взаимоиנדуктивностей по продольной оси между основными обмотками и обмоткой возбуждения $M_{\text{Адм}}$, между дополнительными обмотками и обмоткой возбуждения $M_{\text{Адп}}$ и между основными и дополнительными обмотками $M_{\text{ддм}}$ в функции тока i_s , относящиеся к генератору типа БСС5-82-4. Темными точками показаны результаты аппроксимации искомым зависимостей.

Анализ показал, что кривые взаимоиנדуктивностей достаточно точно аппроксимируются уравнением гиперболы, тогда

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } i_{d\text{м}} \leq i_{d\text{м1}} \quad M_{\text{ддп}} = M_{\text{д0}}, M_{\text{Адп}} = M_{\text{Ад0}}, M_{\text{Адм}} = M_{\text{Ад0}}; \\ \text{при } i_{d\text{м}} > i_{d\text{м1}} \quad M_{\text{ддп}} = \frac{a_{1\text{м}}}{b_{1\text{м}} + i_{d\text{м}}}, M_{\text{Адп}} = \frac{a_{2\text{м}}}{b_{2\text{м}} + i_{d\text{м}}}, M_{\text{Адм}} = \frac{a_{3\text{м}}}{b_{3\text{м}} + i_{d\text{м}}}, \end{array} \right\} (2.96)$$

где $i_{d\text{м1}}$ - значение результирующего тока по продольной оси, соответствующее переходу к насыщенной части характеристики холостого хода; $M_{\text{д0}}, M_{\text{Ад0}}, M_{\text{Ад0}}$ - ненасыщенные значения взаимоиנדуктивностей; $a_{1\text{м}}, b_{1\text{м}}, a_{2\text{м}}, b_{2\text{м}}, a_{3\text{м}}, b_{3\text{м}}$ - постоянные коэффициенты.

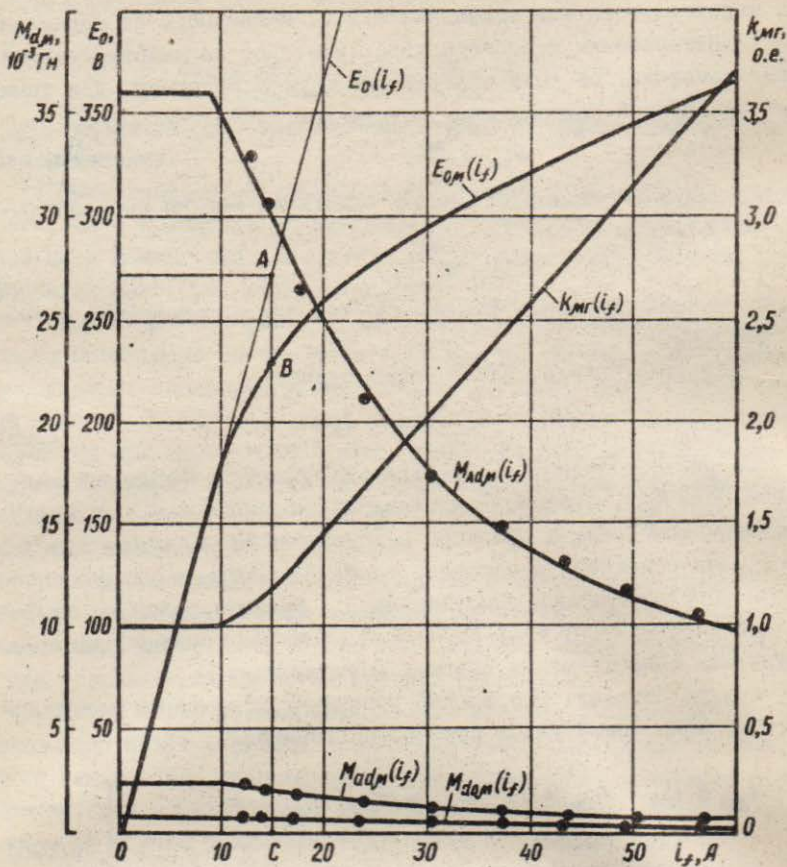


Рис.2.16. К определению взаимсндуктивностей обмоток синхронного генератора с учетом насыщения магнитной системы.

2.2.3. Дифференциальные уравнения асинхронных двигателей рабочих органов

Для исследования совместной работы асинхронных двигателей рабочих органов и синхронного генератора, дифференциальные уравнения асинхронных двигателей удобно записать в системе координат x, y , вращающихся относительно статора двигателя со скоростью его поля ω . Эта система оказывается жестко связанной с положением ротора синхронного генератора или его координатной системой d, q , что упрощает расчеты / 61 /.

Дифференциальные уравнения двигателя первого рабочего органа в системе координат x, y запишутся как

$$\left. \begin{aligned} u_{x1}^{(n)} &= \frac{d\psi_{x1}^{(n)}}{dt} + \omega \psi_{y1}^{(n)} + r_1^{(n)} i_{x1}^{(n)} ; \\ u_{y1}^{(n)} &= \frac{d\psi_{y1}^{(n)}}{dt} - \omega \psi_{x1}^{(n)} + r_1^{(n)} i_{y1}^{(n)} ; \\ 0 &= \frac{d\psi_{x2}^{(n)}}{dt} + (\omega - \omega_g^{(n)}) \psi_{y2}^{(n)} + r_2^{(n)} i_{x2}^{(n)} ; \\ 0 &= \frac{d\psi_{y2}^{(n)}}{dt} - (\omega - \omega_g^{(n)}) \psi_{x2}^{(n)} + r_2^{(n)} i_{y2}^{(n)} ; \\ M_g^{(n)} &= \frac{3}{2} p_g^{(n)} M_M^{(n)} (i_{x1}^{(n)} i_{y2}^{(n)} - i_{x2}^{(n)} i_{y1}^{(n)}) ; \\ M_g^{(n)} - M_c^{(n)} &= \frac{J_g^{(n)}}{p_g^{(n)}} \frac{d\omega_g^{(n)}}{dt} , \end{aligned} \right\} (2.97)$$

потокосцепления обмоток двигателя

$$\left. \begin{aligned} \psi_{x1}^{(n)} &= L_{SM}^{(n)} i_{x1}^{(n)} + M_M^{(n)} i_{x2}^{(n)} ; \\ \psi_{y1}^{(n)} &= L_{SM}^{(n)} i_{y1}^{(n)} + M_M^{(n)} i_{y2}^{(n)} ; \\ \psi_{x2}^{(n)} &= L_{SM}^{(n)} i_{x2}^{(n)} + M_M^{(n)} i_{x1}^{(n)} ; \\ \psi_{y2}^{(n)} &= L_{SM}^{(n)} i_{y2}^{(n)} + M_M^{(n)} i_{y1}^{(n)} , \end{aligned} \right\} (2.98)$$

где $U_{x1}^{(i)}, U_{y1}^{(i)}$ - напряжения на зажимах двигателя по осям x, y ;
 $\Psi_{x1}^{(i)}, \Psi_{y1}^{(i)}, \Psi_{x2}^{(i)}, \Psi_{y2}^{(i)}$ и $L_{x1}^{(i)}, L_{y1}^{(i)}, L_{x2}^{(i)}, L_{y2}^{(i)}$ - потокоцепления и
 токи статора и ротора двигателя по осям x, y ; Z_1 и Z_2 - активные
 сопротивления фаз обмоток статора и ротора двигателя; $M_{\mu}^{(i)}$ - вза-
 имноиндуктивность между обмотками статора и ротора; $M_{\theta}^{(i)}$ - элек-
 тромагнитный момент двигателя; $J_{\theta}^{(i)}$ - приведенный момент инерции
 двигателя и рабочей машины; $p_{\theta}^{(i)}$ - число пар полюсов двигателя;
 $\omega_{\theta}^{(i)}$ - скорость двигателя; $M_c^{(i)}$ - момент сопротивления рабочей
 машины; $L_{\Sigma M}^{(i)} = M_M^{(i)} + L_{1M}^{(i)}$; $L_{\Sigma R}^{(i)} = M_M^{(i)} + L_{2M}^{(i)}$; $L_{1M}^{(i)}, L_{2M}^{(i)}$ - индуктивности об-
 моток статора и ротора.

Механическую характеристику рабочего органа опишем выраже-
 нием / 4, 75 /

$$M_c^{(i)} = M_{c0}^{(i)} + (M_{cH}^{(i)} - M_{c0}^{(i)}) \left(\frac{\omega_{\theta}^{(i)} X_{(i)}}{\omega_{\theta H}^{(i)}} \right) + M_{Tp}^{(i)} e^{-c\omega_{\theta}^{(i)}} + M_c^{(i)}(t), \quad (2.99)$$

где $M_{c0}^{(i)}, M_{cH}^{(i)}$ - начальный и номинальный момент рабочего органа;
 $M_{Tp}^{(i)}$ - превышение момента трогания рабочего органа над началь-
 ным моментом; $M_c^{(i)}(t)$ - составляющая момента сопротивления, задаю-
 щаяся в соответствии с дополнительными условиями; $\omega_{\theta H}^{(i)}$ - номиналь-
 ная скорость рабочего органа; $X_{(i)}$ - показатель степени; c - коэф-
 фициент характеризующий интенсивность спада момента трогания.

Уравнения двигателей и механические характеристики других
 рабочих органов запишутся аналогично (2.97)...(2.99), но со
 своими индексами коэффициентов и переменных.

Параметры асинхронного двигателя в общем случае являются
 переменными, так как: при перевозбуждении синхронного генератора
 напряжение на зажимах двигателя может вырасти, что приведет к
 увеличению основного магнитного потока и насыщению магнитной цепи
 машины, в результате чего уменьшится взаимная индуктивность об-
 моток статора и ротора M_M , и, напротив, при уменьшении напря-
 жения двигатель переходит на работу в линейную часть кривой на-
 магничивания и M_M будет больше номинального значения; с увели-
 чением токов в обмотках при пуске или перегрузке двигателя,
 вследствие возрастания потоков рассеяния происходит насыщение
 коронок и тела зубцов, в результате индуктивности рассеяния $L_{\Sigma M}$
 и $L_{\Sigma R}$ уменьшаются; при пуске с увеличением скольжения и частоты

вторичного тока под влиянием поверхностного эффекта сопротивле-
ние $r_{2\delta}$ увеличивается, а $L_{\Sigma M}$ уменьшается.

Учет изменения параметров весьма непросто, поскольку от-
сутствуют реальные зависимости их в функции токов, потоков или
частоты вращения, кроме того, изменение параметров, как прави-
ло, происходит одновременно под действием нескольких факторов.
Поэтому учет нелинейностей параметров двигателя произведем при
следующих допущениях: несмотря на насыщение стали, магнитные
индукции в воздушном зазоре машины распределяются синусоидаль-
но, магнитная проводимость по внутреннему диаметру статора по-
стоянна и не зависит от положения ротора; насыщения по главному
пути магнитного потока и по путям рассеяния не влияют друг на
друга и могут учитываться раздельно; изменение параметра, вызван-
ное несколькими факторами, представляем в функции величины,
оказывающей наибольшее влияние /50 /.

Учет изменения взаимоиנדуктивности M_M проведем в функции
напряжения на зажимах машины, используя при этом характеристику
холостого хода двигателя $I_0(U_0)$. Из этой характеристики, снятой
экспериментально, находим коэффициент насыщения магнитной цепи
 $K_{Mg}(U_0)$, подобно тому, как определяли аналогичный коэффициент
для синхронного генератора. Далее взаимоиנדуктивность с учетом
насыщения магнитной цепи для каждого значения напряжения U_0
найдем как

$$M_M = \frac{M_{M0}}{K_{Mg}},$$

где M_{M0} — ненасыщенное значение взаимоиנדуктивности.

Расчеты показали, что в исследуемом диапазоне изменения
напряжения в системе, M_M при насыщении магнитной системы изме-
няется примерно по линейному закону. Тогда уравнения асинхрон-
ного двигателя необходимо дополнить следующими условиями

$$\left. \begin{aligned} \text{при } U_i^{(n)} \leq U_{in}^{(n)}, \quad M_M^{(n)} &= M_{M0}^{(n)} ; \\ \text{при } U_i^{(n)} > U_{in}^{(n)}, \quad M_M^{(n)} &= \alpha_i^{(n)} + \beta_i^{(n)} U_i^{(n)} ; \\ U_i^{(n)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(U_{x1}^{(n)})^2 + (U_{y1}^{(n)})^2}, \end{aligned} \right\} \quad (2.100)$$

где $U_i^{(1)}$ - модуль изображающего вектора напряжения на зажимах двигателя; $U_{н}^{(1)}$ - значение напряжения, с которого начинается насыщение магнитной системы машины; $M_{\mu 0}^{(1)}$ - ненасыщенное значение взаимоиנדуктивности первого двигателя; $a_i^{(1)}$ и $b_i^{(1)}$ - постоянные коэффициенты.

Характеристика холостого хода двигателя типа 4A90L2УЗ, зависимости коэффициента насыщения и взаимоиנדуктивности обмоток этого двигателя от напряжения приведены на рис.2.17. Темными точками показаны результаты аппроксимации зависимости $M_{\mu 0}(U_0)$.

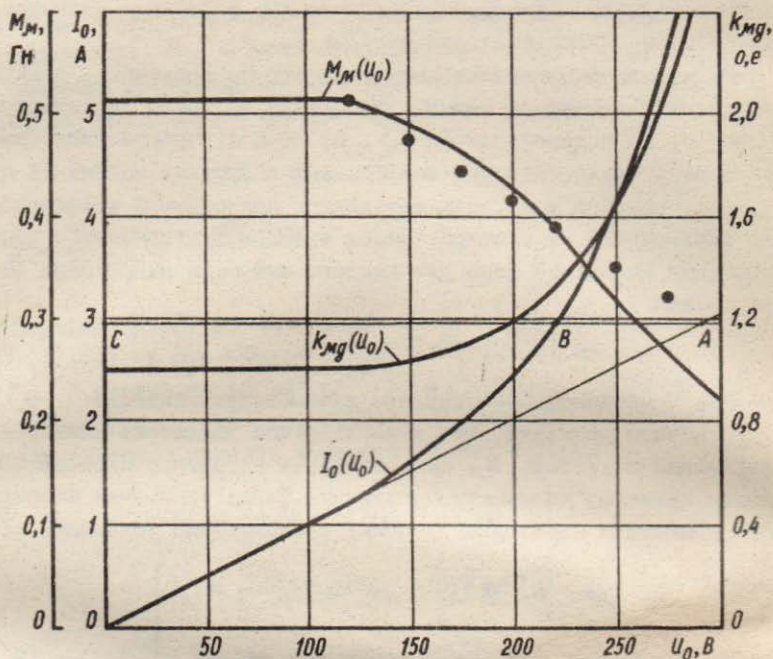


Рис.2.17. К определению взаимоиנדуктивности обмоток двигателя с учетом насыщения магнитной цепи,

Реактивное сопротивление рассеяния обмотки ротора X_2' в большей степени зависит от насыщения в зубцовой зоне, чем от явления поверхностного эффекта, поэтому в расчетах используем зависимость $X_2'(I_2)$ или $L_2'(I_2)$. Для этого, по известным из паспортных данных двигателя параметрам X_1 , X_2' и X_{KM} , определим зависимости $X_{1M}(I_1)$ и $X_{2M}'(I_2)$, приняв график $X_{KM}(I_1) = (X_{1M} + X_{2M}')/I_1$ линейным и влияние насыщения путей рассеяния на изменение индуктивных сопротивлений статора и ротора одинаковым. При этом значение X_{KM} необходимо разделить пропорционально значениям X_1 и $X_2' / 50$ %. Тогда, заменив реактивные сопротивления соответствующими индуктивностями, получим

$$\left. \begin{aligned} L_{1M}^{(i)} &= a_2^{(i)} + b_2^{(i)} I_1^{(i)}; \quad L_{2M}^{(i)} = a_3^{(i)} + b_3^{(i)} I_2^{(i)}; \\ I_1^{(i)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(i_{x1}^{(i)})^2 + (i_{y1}^{(i)})^2}; \quad I_2^{(i)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(i_{x2}^{(i)})^2 + (i_{y2}^{(i)})^2}, \end{aligned} \right\} (2.101)$$

где $I_1^{(i)}$, $I_2^{(i)}$ - модули изображающих векторов тока статора и ротора первого двигателя; $a_2^{(i)}$, $b_2^{(i)}$, $a_3^{(i)}$, $b_3^{(i)}$ - постоянные коэффициенты.

Расчет активного сопротивления $Z_{2\frac{v}{k}}$ обмотки ротора с учетом вытеснения тока в стержнях проводим аналитически, основываясь на известной зависимости приведенной высоты стержня ротора от скольжения $\frac{s}{2}$ (%). Соответствующая методика приведена в приложении 3.

Уравнения двигателей и механические характеристики других рабочих органов запишутся аналогично (2.97)...(2.101), но со своими индексами коэффициентов и переменных.

Приведенные уравнения позволяют моделировать все режимы работы асинхронного двигателя в системе автономного электропривода мобильной машины.

2.2.4. Учет соединительных кабелей и уравнения связи

Рабочий орган может быть отдален от генератора на значительное расстояние, например, в дождевальных машинах до 400 м. В этих условиях, особенно при исследовании режимов пуска асинхронных двигателей необходимо учитывать падение напряжения в силовом кабеле.

Фазные напряжения на зажимах двигателя первого рабочего органа будут меньше напряжения генератора на величину падения напряжения на активном сопротивлении жилы кабеля и э.д.с. самоиндукции

$$\left. \begin{aligned} U_{Aa}^{(n)} &= U_A - \chi_A^{(n)} i_A^{(n)} - \frac{d\psi_{Aa}^{(n)}}{dt}; \\ U_{Ba}^{(n)} &= U_B - \chi_B^{(n)} i_B^{(n)} - \frac{d\psi_{Ba}^{(n)}}{dt}; \\ U_{Ca}^{(n)} &= U_C - \chi_C^{(n)} i_C^{(n)} - \frac{d\psi_{Ca}^{(n)}}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2.102)$$

где $U_{Aa}^{(n)}, U_{Ba}^{(n)}, U_{Ca}^{(n)}$ - напряжения в конце линии; $i_A^{(n)}, i_B^{(n)}, i_C^{(n)}$ - фазные токи двигателя; χ_A - активное сопротивление фазы кабеля; $\psi_{Aa}, \psi_{Ba}, \psi_{Ca}$ - потокосцепления жил кабеля.

Потокосцепления в (2.102) находим как

$$\psi_{Aa} = L_A i_A; \quad \psi_{Ba} = L_A i_B; \quad \psi_{Ca} = L_A i_C, \quad (2.103)$$

где L_A - индуктивность фазы кабеля.

Заменяя по (2.23) исходные переменные на новые в осях x, y , получим

$$\left. \begin{aligned} U_{x1}^{(n)} &= U_{d0} - \chi_A^{(n)} i_{x1}^{(n)} - \frac{d\psi_{x1a}^{(n)}}{dt}; \\ U_{y1}^{(n)} &= U_{e0} - \chi_B^{(n)} i_{y1}^{(n)} - \frac{d\psi_{y1a}^{(n)}}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2.104)$$

и

$$\psi_{x1a}^{(n)} = L_A^{(n)} i_{x1}^{(n)}; \quad \psi_{y1a}^{(n)} = L_B^{(n)} i_{y1}^{(n)}, \quad (2.105)$$

где $\psi_{x1a}^{(n)}, \psi_{y1a}^{(n)}$ - потокосцепления жил кабеля по осям x, y .

Для других двигателей (2.104) и (2.105) запишутся также, но со своими индексами.

Система (2.104) представляет собой связь между уравнениями генератора и двигателей по напряжению. Уравнения связи по току запишем в соответствии с первым законом Кирхгофа

$$i_{d0} = \sum_{k=1}^n i_{x1}^{(k)} ; \quad i_{g0} = \sum_{k=1}^n i_{y1}^{(k)} , \quad (2.106)$$

где n - число двигателей рабочей машины.

В ряде случаев, когда сельскохозяйственная машина имеет несколько однотипных двигателей, математические модели двигателей, работающих в одинаковых режимах и условиях, целесообразно заменить одной, с последующим учетом этой замены в (2.106) как

$$\left. \begin{aligned} i_{d0} &= i_{x1}^{(1)} + n_g i_{x1}^{(2)} ; \\ i_{g0} &= i_{y1}^{(1)} + n_g i_{y1}^{(2)} , \end{aligned} \right\} \quad (2.107)$$

где $i_{x1}^{(1)}, i_{y1}^{(1)}$ - токи второго двигателя в осях x, y ; n_g - число двигателей одного типа, работающих в одинаковых режимах и условиях, что и второй.

Уравнения (2.107) позволяют изучать переходные процессы пуска одного двигателя при " n_g " работающих параллельно, для чего необходимо выполнить условие

$$\left. \begin{aligned} \text{если } t < t_g \text{ то } i_{x1}^{(1)} = 0, i_{y1}^{(1)} = 0, i_{x2}^{(1)} = 0, i_{y2}^{(1)} = 0 ; \\ n_g = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1 , \end{aligned} \right\} \quad (2.108)$$

где t_g - момент пуска первого двигателя.

Данный прием позволяет существенно уменьшить объем математической модели автономной многодвигательной системы.

2.2.5. Уравнения системы автономного электропривода в относительных единицах

Уравнения системы автономного электропривода обычно записывают в относительных единицах. Переход к системе относительных единиц упрощает запись уравнений, облегчает вычисления

и делает возможным сравнение результатов, получаемых для машин различной мощности.

Для перехода к системе относительных единиц определим всю совокупность базисных величин. Для цепи основной обмотки статора синхронной машины примем следующие общепринятые базисные величины: $I_{\delta} = I_{\text{фн}}$ - базисный ток статора, равный амплитуде номинального фазного тока основной обмотки статора; $U_{\delta} = U_{\text{фн}}$ - базисное напряжение статора, равное амплитуде номинального фазного напряжения статора; $\omega_{\delta} = \omega_c = 2\pi f_n$ - базисная угловая частота, равная синхронной; $\psi_{\delta} = U_{\delta} / \omega_{\delta}$ - базисное потокосцепление; $z_{\delta} = U_{\delta} / I_{\delta}$ - базисное сопротивление статора; $P_{\delta} = S_n = 3U_n I_n = 1,5 U_{\delta} I_{\delta}$ - базисная мощность, принимаемая равной полной номинальной мощности (S_n) машины, здесь, U_n, I_n - действующие номинальные фазные напряжение и ток статора; $M_{\delta} = P_{\delta} p_n / \omega_{\delta}$ - базисный момент; $L_{\delta} = z_{\delta} / \omega_{\delta}$ - базисная индуктивность статора; $t_{\delta} = 1 / \omega_c$ - базисное время, соответствующее повороту ротора синхронной машины при базисной угловой частоте на 1 рад.эл. Время выраженное в долях t_{δ} обозначим как $\tau = t / t_{\delta} = t \omega_c$.

Базисные величины для роторной цепи синхронной машины и цепи дополнительной обмотки статора примем такими, при которых уравнения напряжений сохраняли форму при переходе от физических величин к относительным, и уравнения потокосцеплений магнитно-связанных контуров удовлетворяли принципу взаимности. Тогда базисные величины цепи ротора и дополнительной обмотки необходимо подчинить следующим условиям / 12 /

$$U_{g\delta} = \omega_{\delta} \psi_{g\delta}; \quad \psi_{g\delta} = L_{g\delta} I_{g\delta}; \quad (2.109)(2.110)$$

$$z_{g\delta} = L_{g\delta} \omega_{\delta}; \quad P_{\delta} = P_{g\delta} = U_{g\delta} I_{g\delta}; \quad (2.111)(2.112)$$

$$U_{f\delta} = \omega_{\delta} \psi_{f\delta}; \quad \psi_{f\delta} = L_{f\delta} I_{f\delta}; \quad (2.113)(2.114)$$

$$z_{f\delta} = L_{f\delta} \omega_{\delta}; \quad P_{\delta} = P_{f\delta} = U_{f\delta} I_{f\delta}. \quad (2.115)(2.116)$$

Уравнения (2.109)...(2.116) позволяют установить связь между базисными величинами обмоток статора и ротора

$$U_{g\delta} = U_{\delta} K_g; \quad L_{g\delta} = L_{\delta} K_g^2; \quad (2.117)(2.118)$$

$$\psi_{g\delta} = \psi_{\delta} K_g; \quad z_{g\delta} = z_{\delta} K_g^2; \quad (2.119)(2.120)$$

$$U_{\delta\delta} = 1,5 U_{\delta} K_{\delta}; \quad L_{\delta\delta} = 1,5 L_{\delta} K_{\delta}^2; \quad (2.121)(2.122)$$

$$\Psi_{\delta\delta} = 1,5 \Psi_{\delta} K_{\delta}; \quad Z_{\delta\delta} = 1,5 Z_{\delta} K_{\delta}^2, \quad (2.123)(2.124)$$

где $K_{\delta} = I_{\delta}/I_{\delta\delta}$, $K_{\delta} = I_{\delta}/I_{\delta\delta}$.

Разделив уравнения регуляторных характеристик дизеля (2.5), (2.7), (2.8) на M_{δ} и (2.7) на ω_{δ} и t_{δ} получим в относительных единицах

$$\left. \begin{aligned} \underline{M}' &= \underline{M}'_H \left[0,5 + 1,5 \frac{\omega}{\omega_{\text{набс}}} - \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{набс}}} \right)^2 \right] \quad \text{при } \omega < \omega_x; \\ \underline{M}' &= \frac{\underline{M}'_2 - \underline{M}'_1}{\underline{\Omega}_2 - \underline{\Omega}_1} \underline{\Omega} - \frac{\underline{M}'_2 - \underline{M}'_1}{\underline{\Omega}_2 - \underline{\Omega}_1} \underline{\Omega}_x + \underline{M}'_x \quad \text{при } \omega \geq \omega_x; \\ \underline{M}'_x &= \underline{M}'_H \left[0,5 + 1,5 \frac{\omega_x}{\omega_{\text{набс}}} - \left(\frac{\omega_x}{\omega_{\text{набс}}} \right)^2 \right]; \\ \omega_x &= \omega_{x0} \quad \text{при } \tau < \tau_1; \\ \omega_x &= \omega_{x0} + \xi (\tau - \tau_1) \quad \text{при } \tau_1 \leq \tau < \tau_2; \\ \omega_x &= \omega_{x0} + \xi (\tau_2 - \tau_1) \quad \text{при } \tau \geq \tau_2, \end{aligned} \right\} (2.125)$$

где $\underline{M}' = \frac{M'}{M_{\delta}}$; $\underline{M}'_H = \frac{M_H}{M_{\delta}}$; $\underline{M}'_x = \frac{M'_x}{M_{\delta}}$; $\underline{M}'_1 = \frac{M'_1}{M_{\delta}}$; $\underline{M}'_2 = \frac{M'_2}{M_{\delta}}$; $\omega = \frac{\Omega P_n}{\omega_{\delta}}$;

$$\omega_{\text{набс}} = \frac{\Omega_H P_n}{\omega_{\delta}}; \quad \omega_x = \frac{\Omega_x P_n}{\omega_{\delta}}; \quad \omega_1 = \frac{\Omega_1 P_n}{\omega_{\delta}}; \quad \omega_2 = \frac{\Omega_2 P_n}{\omega_{\delta}}; \quad \omega_{x0} = \frac{\Omega_{x0} P_n}{\omega_{\delta}}$$

$$\xi = \frac{\xi P_n}{\omega_{\delta}^2}; \quad \tau_2 = \frac{t_1}{t_{\delta}}; \quad \tau_2 = \frac{t_2}{t_{\delta}}.$$

Разделив уравнения движения ДВС МЭС (2.40) на M_{δ} , формулы определяющие $K_{\text{сц}}$ в той же системе на t_{δ} найдем

$$\left. \begin{aligned} \underline{M}' - K_{\text{взм}} \underline{M}_r - K_{\text{сц}} \underline{M}_{\text{спер}} &= (H_{\text{зтр}} + K_{\text{сц}} H_{\text{зп}}) \frac{d\omega}{d\tau} + K_{\text{сц}} H_{\text{зп}} \frac{\omega}{\tau_4 - \tau_3}; \\ \omega_{\text{сц}} &= K_{\text{сц}} \omega; \\ K_{\text{сц}} &= 0 \quad \text{при } \tau < \tau_3; \\ K_{\text{сц}} &= \frac{\tau}{\tau_4 - \tau_3} - \frac{\tau_3}{\tau_4 - \tau_3} \quad \text{при } \tau_3 \leq \tau \leq \tau_4; \\ K_{\text{сц}} &= 1 \quad \text{при } \tau > \tau_4, \end{aligned} \right\} (2.126)$$

$$\text{где } M_r = \frac{M_r}{M_s}; M_{\text{пер}} = \frac{M_{\text{пер}}}{M_s}; H_{\text{гтр}} = J_{\text{тр}} \frac{\omega_s^2}{M_s P_n}; H_{\text{гп}} = J_{\text{п}} \frac{\omega_s^2}{M_s P_n};$$

$$K_{\text{всм}} = \frac{1}{i_{\text{всм}} \varrho_{\text{всм}}}; M_{\text{снер}} = [(f_r \cos d \pm \sin d) G_r + (f_k \cos d \pm \sin d) G_m +$$

$$+ F_p] \frac{R_{k3}}{i_{\text{тр}} \varrho_{\text{тр}}}; J_{\text{тр}} = \frac{J_r}{i_{\text{всм}}^2} + 0,001 G_r \frac{R_{k3}}{g}; J_{\text{п}} = (1,15 G_r + \delta_{\text{всм}} G_m) \frac{R_{k3}}{g i_{\text{тр}}^2};$$

$$\omega_{\text{сч}} = \frac{\Omega_{\text{сч}} P_n}{\omega_s}; \tau_3 = \frac{t_3}{t_s}; \tau_4 = \frac{t_4}{t_s}; \frac{d}{d\tau} = \frac{d}{d\tau \omega_s}.$$

Здесь $H_{\text{гтр}}$ назовем инерционной постоянной трансмиссии и привода генератора, $H_{\text{гп}}$ - привода двигателей.

Скорость передвижения агрегата в относительных единицах найдем, разделив (2.4I) на ω_s и сделав преобразования

$$\underline{v} = \frac{\underline{\omega}_{\text{сч}}}{\omega_s}, \quad (2.127)$$

$$\text{где } \underline{v} = \frac{v}{v_s}; v_s = \frac{\omega_s R_{k3}}{P_n i_{\text{тр}}}.$$

Поделив (2.68) на $U_s = \psi_s \omega_s = z_s I_s$, уравнения (2.69), (2.70), (2.65) на $U_{gs} = \psi_{gs} \omega_s = z_{gs} I_{gs}$, (2.65) на $U_{ss} = \psi_{ss} \omega_s = z_{ss} I_{ss}$ уравнение (2.73) на $P_s = 1,5 \psi_s I_s P_n$ получим для синхронного генератора типа ЕСС5-82-4 уравнения напряжений и электромагнитного момента в относительных единицах

$$\left. \begin{aligned} -\underline{U}_{d0} &= \frac{d\underline{\psi}_{d0}}{d\tau} + \underline{\omega} \underline{\psi}_{q0} + \underline{x}_0 \underline{i}_{d0}; \\ -\underline{U}_{q0} &= \frac{d\underline{\psi}_{q0}}{d\tau} - \underline{\omega} \underline{\psi}_{d0} + \underline{x}_0 \underline{i}_{q0}; \end{aligned} \right\} \quad (2.128)$$

$$\left. \begin{aligned} -\underline{U}_{dg} &= \frac{d\underline{\psi}_{dg}}{d\tau} + \underline{\omega} \underline{\psi}_{qg} + \underline{x}'_g \underline{i}_{dg} - \underline{x}_k (\underline{i}_{d0} + \sqrt{3} \underline{i}_{q0}); \\ -\underline{U}_{qg} &= \frac{d\underline{\psi}_{qg}}{d\tau} - \underline{\omega} \underline{\psi}_{dg} + \underline{x}'_g \underline{i}_{qg} + \underline{x}_k (\sqrt{3} \underline{i}_{d0} - \underline{i}_{q0}); \end{aligned} \right\} \quad (2.129)$$

$$\left. \begin{aligned} U_a &= U_{dg} \cos \delta + U_{gq} \sin \delta; \\ U_B &= U_{dg} \cos(\delta - 120^\circ) + U_{gq} \sin(\delta - 120^\circ); \\ U_c &= U_{dg} \cos(\delta + 120^\circ) + U_{gq} \sin(\delta + 120^\circ); \end{aligned} \right\} (2.130)$$

если $0^\circ \leq \delta \leq 30^\circ$ или $330^\circ < \delta \leq 360^\circ$ то

$$\frac{2}{3} \frac{1}{K_{gf}} \dot{I}_c \chi_f + \frac{d\psi_f}{dt} = K_{gf} (U_c - U_a), \quad \frac{3}{2} K_{gf} \dot{I}_f = \dot{I}_c = -\dot{I}_B, \quad \dot{I}_a = 0;$$

если $30^\circ < \delta \leq 90^\circ$ то

$$\frac{2}{3} \frac{1}{K_{gf}} \dot{I}_a \chi_f + \frac{d\psi_f}{dt} = K_{gf} (U_a - U_B), \quad \frac{3}{2} K_{gf} \dot{I}_f = \dot{I}_a = -\dot{I}_B, \quad \dot{I}_c = 0;$$

если $90^\circ < \delta \leq 150^\circ$ то

$$\frac{2}{3} \frac{1}{K_{gf}} \dot{I}_a \chi_f + \frac{d\psi_f}{dt} = K_{gf} (U_a - U_c), \quad \frac{3}{2} K_{gf} \dot{I}_f = \dot{I}_a = -\dot{I}_c, \quad \dot{I}_B = 0; \quad (2.131)$$

если $150^\circ < \delta \leq 210^\circ$ то

$$\frac{2}{3} \frac{1}{K_{gf}} \dot{I}_B \chi_f + \frac{d\psi_f}{dt} = K_{gf} (U_B - U_c), \quad \frac{3}{2} K_{gf} \dot{I}_f = \dot{I}_B = -\dot{I}_c, \quad \dot{I}_a = 0;$$

если $210^\circ < \delta \leq 270^\circ$ то

$$\frac{2}{3} \frac{1}{K_{gf}} \dot{I}_B \chi_f + \frac{d\psi_f}{dt} = K_{gf} (U_B - U_a), \quad \frac{3}{2} K_{gf} \dot{I}_f = \dot{I}_B = -\dot{I}_a, \quad \dot{I}_c = 0;$$

если $270^\circ < \delta \leq 330^\circ$ то

$$\frac{2}{3} \frac{1}{K_{gf}} \dot{I}_c \chi_f + \frac{d\psi_f}{dt} = K_{gf} (U_c - U_a), \quad \frac{3}{2} K_{gf} \dot{I}_f = \dot{I}_c = -\dot{I}_a, \quad \dot{I}_B = 0; \quad (2.132)$$

$$M_{эм} = \psi_{d0} \dot{I}_{q0} - \psi_{q0} \dot{I}_{d0} + \psi_{dg} \dot{I}_{qg} - \psi_{gg} \dot{I}_{dg},$$

где

$$U_{d0} = \frac{U_{d0}}{U_B}; \quad U_{q0} = \frac{U_{q0}}{U_B}; \quad \psi_{d0} = \frac{\psi_{d0}}{\psi_B}; \quad \psi_{q0} = \frac{\psi_{q0}}{\psi_B}; \quad \dot{I}_{d0} = \frac{\dot{I}_{d0}}{I_B}; \quad \dot{I}_{q0} = \frac{\dot{I}_{q0}}{I_B};$$

$$\chi_0 = \frac{\chi_0}{z_B}; \quad U_{dg} = \frac{U_{dg}}{U_{gB}}; \quad U_{gg} = \frac{U_{gg}}{U_{gB}}; \quad \psi_{dg} = \frac{\psi_{dg}}{\psi_{gB}}; \quad \psi_{gg} = \frac{\psi_{gg}}{\psi_{gB}}; \quad \dot{I}_{dg} = \frac{\dot{I}_{dg}}{I_{gB}};$$

$$\dot{I}_{gB} = \frac{\dot{I}_{gB}}{I_{gB}}; \quad \chi_g = \frac{\chi_g}{z_{gB}}; \quad \chi_k = \frac{K_g \chi_k}{2K z_{gB}}; \quad U_a = \frac{U_a}{U_{gB}}; \quad U_B = \frac{U_B}{U_{gB}}; \quad U_c = \frac{U_c}{U_{gB}};$$

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{I}_a}{I_{gB}}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{I}_B}{I_{gB}}; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{I}_c}{I_{gB}}; \quad \dot{I}_f = \frac{\dot{I}_f}{I_{fB}}; \quad \psi_f = \frac{\psi_f}{\psi_{fB}}; \quad \tau_f = \frac{\tau_f}{z_{fB}}; \quad K_{gf} = \frac{2}{3} \frac{I_{fB}}{I_{gB}}; \quad N_{эм} = \frac{M_{эм}}{M_B}$$

Потокоцепления в относительных единицах найдем, разделив уравнения (2.71) на $\Psi_{\delta} = L_{\delta} I_{\delta}$ и $\Psi_{g\delta} = L_{g\delta} I_{g\delta}$ и (2.72) на $\Psi_{\delta} = L_{\delta} I_{\delta}$, (2.95) и (2.96) на I_{δ} и L_{δ}

$$\left. \begin{aligned} \underline{\Psi}_{d\delta} &= \underline{L}_{d\delta} \underline{i}_{d\delta} + \underline{M}_{d\delta m} \underline{i}_{d\delta} + \underline{M}_{ad\delta m} \underline{i}_{\delta}; \\ \underline{\Psi}_{g\delta} &= \underline{L}_{g\delta} \underline{i}_{g\delta} + \underline{M}_{g\delta} \underline{i}_{g\delta}; \\ \underline{\Psi}_{d\delta} &= \underline{M}_{d\delta m} \underline{i}_{d\delta} + \underline{L}_{d\delta} \underline{i}_{d\delta} + \underline{M}_{ad\delta m} \underline{i}_{\delta}; \\ \underline{\Psi}_{g\delta} &= \underline{M}_{g\delta} \underline{i}_{g\delta} + \underline{L}_{g\delta} \underline{i}_{g\delta}; \\ \underline{\Psi}_{\delta} &= \underline{M}_{ad\delta m} \underline{i}_{d\delta} + \underline{M}_{ad\delta m} \underline{i}_{d\delta} + \underline{L}_{\delta} \underline{i}_{\delta}; \end{aligned} \right\} (2.133)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{i}_{d\delta} &= K_{\delta} \underline{i}_{d\delta} + \frac{2}{3} \frac{1}{K_{g\delta}} \underline{L}_{d\delta} + \underline{i}_{\delta}; \\ \text{если } \underline{i}_{d\delta} \leq \underline{i}_{d\delta 1} \text{ то } \underline{M}_{d\delta m} &= \underline{M}_{d\delta}, \underline{M}_{ad\delta m} = \underline{M}_{a\delta d}, \underline{M}_{ad\delta m} = \underline{M}_{a\delta d}; \\ \text{если } \underline{i}_{d\delta} > \underline{i}_{d\delta 1} \text{ то } \underline{M}_{d\delta m} &= \frac{\sigma_{1m}}{\beta_{1m} + \underline{i}_{d\delta}}, \underline{M}_{ad\delta m} = \frac{\sigma_{2m}}{\beta_{2m} + \underline{i}_{d\delta}}; \\ \underline{M}_{ad\delta m} &= \frac{\sigma_{3m}}{\beta_{3m} + \underline{i}_{d\delta}}; \end{aligned} \right\} (2.134)$$

где $\underline{L}_{d\delta} = \frac{L_{d\delta}}{L_{\delta}}; \underline{M}_{d\delta m} = \frac{M_{d\delta m}}{L_{\delta} K_{\delta}}; \underline{M}_{ad\delta m} = \frac{M_{ad\delta m}}{L_{\delta} K_{\delta}}; \underline{L}_{g\delta} = \frac{L_{g\delta}}{L_{\delta}}; \underline{M}_{g\delta} = \frac{M_{g\delta}}{L_{\delta} K_{\delta}};$

$\underline{L}_{d\delta} = \frac{L_{d\delta}}{L_{\delta} K_{\delta}^2}; \underline{M}_{ad\delta m} = \frac{M_{ad\delta m}}{L_{\delta} K_{\delta} K_{\delta}}; \underline{L}_{g\delta} = \frac{L_{g\delta}}{L_{\delta} K_{\delta}^2}; \underline{L}_{\delta} = \frac{L_{\delta}}{L_{\delta} K_{\delta}^2}; \underline{i}_{d\delta} = \frac{i_{d\delta}}{I_{\delta}};$

$\underline{i}_{d\delta 1} = \frac{i_{d\delta 1}}{I_{\delta}}; \underline{M}_{d\delta} = \frac{M_{d\delta}}{L_{\delta} K_{\delta}}; \underline{M}_{a\delta d} = \frac{M_{a\delta d}}{L_{\delta} K_{\delta}}; \underline{M}_{a\delta d} = \frac{M_{a\delta d}}{L_{\delta} K_{\delta} K_{\delta}};$

$\sigma_{1m}, \beta_{1m}, \sigma_{2m}, \beta_{2m}, \sigma_{3m}, \beta_{3m}$ - постоянные коэффициенты.

Наконец, разделив (2.64) на $\gamma_{\delta} = \omega_{\delta} t_{\delta}$, запишем

$$\underline{\gamma} = \int_0^{\tau} \underline{\omega} d\tau + \underline{\gamma}_0, \quad (2.135)$$

где $\underline{y} = \frac{y}{y_0}$, $\underline{z}_0 = \frac{z_0}{z_0}$.

Уравнения (2.117)...(2.127) и есть совместные уравнения ДВС и синхронного генератора МЭС в относительных единицах.

Базисные величины переменных обмоток статора асинхронного двигателя приравниваем к базисным величинам основной обмотки статора генератора, поскольку эти обмотки составляют одну цепь. Базисный ток ротора асинхронного двигателя принимаем таким, чтобы он создавал в воздушном зазоре такую же первую гармонику поля, как и продольная реакция статора при базисном токе. Другие базисные величины ротора приравниваем базисным величинам для статорных контуров.

Поделив уравнения системы (2.97) на $U_g = \omega_g \Psi_g = z_g I_g$ и $M_g = 1,5 L_g I_g^2 p_n$ найдем уравнения напряжений, электромагнитного момента и уравнение движения асинхронного двигателя в относительных единицах

$$\left. \begin{aligned} \underline{u}_{x1}^{(n)} &= \frac{d\underline{\psi}_{x1}^{(n)}}{d\tau} + \underline{\omega} \underline{\psi}_{y1}^{(n)} + \underline{z}_1^{(n)} \underline{i}_{x1}^{(n)}; \\ \underline{u}_{y1}^{(n)} &= \frac{d\underline{\psi}_{y1}^{(n)}}{d\tau} - \underline{\omega} \underline{\psi}_{x1}^{(n)} + \underline{z}_1^{(n)} \underline{i}_{y1}^{(n)}; \\ 0 &= \frac{d\underline{\psi}_{x2}^{(n)}}{d\tau} + (\underline{\omega} - \underline{\omega}_g^{(n)}) \underline{\psi}_{y2}^{(n)} + \underline{z}_{2g}^{(n)} \underline{i}_{x2}^{(n)}; \\ 0 &= \frac{d\underline{\psi}_{y2}^{(n)}}{d\tau} - (\underline{\omega} - \underline{\omega}_g^{(n)}) \underline{\psi}_{x2}^{(n)} + \underline{z}_{2g}^{(n)} \underline{i}_{y2}^{(n)}; \\ \underline{M}_g^{(n)} &= \underline{M}_m^{(n)} p_g^{(n)} (\underline{i}_{x1}^{(n)} \underline{i}_{y2}^{(n)} - \underline{i}_{x2}^{(n)} \underline{i}_{y1}^{(n)}); \\ \underline{M}_g^{(n)} - \underline{M}_c^{(n)} &= H_g^{(n)} \frac{d\underline{\omega}_g^{(n)}}{d\tau}, \end{aligned} \right\} (2.136)$$

где $\underline{u}_{x1}^{(n)} = \frac{u_{x1}^{(n)}}{U_g}$; $\underline{u}_{y1}^{(n)} = \frac{u_{y1}^{(n)}}{U_g}$; $\underline{\psi}_{x1}^{(n)} = \frac{\psi_{x1}^{(n)}}{\Psi_g}$; $\underline{\psi}_{y1}^{(n)} = \frac{\psi_{y1}^{(n)}}{\Psi_g}$; $\underline{i}_{x1}^{(n)} = \frac{i_{x1}^{(n)}}{I_g}$;
 $\underline{i}_{y1}^{(n)} = \frac{i_{y1}^{(n)}}{I_g}$; $\underline{z}_1^{(n)} = \frac{z_1^{(n)}}{z_g}$; $\underline{\psi}_{x2}^{(n)} = \frac{\psi_{x2}^{(n)}}{\Psi_g}$; $\underline{\psi}_{y2}^{(n)} = \frac{\psi_{y2}^{(n)}}{\Psi_g}$; $\underline{i}_{x2}^{(n)} = \frac{i_{x2}^{(n)}}{I_g}$;

$$\begin{aligned} \dot{i}_{y2}^{(1)} &= \frac{i_{y2}^{(1)}}{I_{\sigma}}; \quad \omega_g^{(1)} = \frac{\omega_g}{\omega_{\sigma}}; \quad \gamma_{2\frac{1}{2}}^{(1)} = \frac{\gamma_{2\frac{1}{2}}}{z_{\sigma}}; \quad M_g^{(1)} = \frac{M_g^{(1)}}{M_{\sigma}}; \quad M_c^{(1)} = \frac{M_c^{(1)}}{M_{\sigma}}; \\ \underline{M}_M^{(1)} &= \frac{M_M^{(1)}}{L_{\sigma}}; \quad \rho_g^{(1)} = \frac{\rho_g^{(1)}}{\rho_{\pi}}; \quad H_{y_g}^{(1)} = \frac{\gamma_g^{(1)} \omega_{\sigma}^2}{\rho_g^{(1)} M_{\sigma}}. \end{aligned}$$

Здесь $- H_{y_g}^{(1)}$ - инерционная постоянная вала ротора первого двигателя, сопротивление $\gamma_{2\frac{1}{2}}$ целесообразно рассчитывать по ранее приведенной методике в величинах с физическими размерностями.

Аналогично запишем механическую характеристику рабочего органа

$$\underline{M}_c^{(1)} = \underline{M}_{c\sigma}^{(1)} + (\underline{M}_{cH}^{(1)} - \underline{M}_{c\sigma}^{(1)}) \left(\frac{\omega_g^{(1)}}{\omega_{gH}^{(1)}} \right)^{X_{(1)}} + \underline{M}_{TP}^{(1)} e^{-\underline{c} \omega_g^{(1)}} + \underline{M}_c^{(1)}(t), \quad (2.137)$$

где $\underline{M}_{c\sigma}^{(1)} = \frac{M_{c\sigma}^{(1)}}{M_{\sigma}}; \quad \underline{M}_{cH}^{(1)} = \frac{M_{cH}^{(1)}}{M_{\sigma}}; \quad \underline{M}_{TP}^{(1)} = \frac{M_{TP}^{(1)}}{M_{\sigma}}; \quad \underline{M}_c^{(1)}(t) = \frac{M_c^{(1)}(t)}{M_{\sigma}};$
 $\omega_{gH}^{(1)} = \frac{\omega_{gH}^{(1)}}{\omega_{\sigma}}; \quad \underline{c} = c \omega_{\sigma}.$

Уравнения потокосцеплений (2.102) переведем в относительные единицы, разделив их на $\Psi_{\sigma} = L_{\sigma} I_{\sigma}$, также в относительных единицах запишем (2.104) и (2.105)

$$\left. \begin{aligned} \underline{\Psi}_{x1}^{(1)} &= \underline{L}_{\sigma M}^{(1)} \dot{i}_{x1}^{(1)} + \underline{M}_M^{(1)} \dot{i}_{x2}^{(1)}; \\ \underline{\Psi}_{y1}^{(1)} &= \underline{L}_{\sigma M}^{(1)} \dot{i}_{y1}^{(1)} + \underline{M}_M^{(1)} \dot{i}_{y2}^{(1)}; \\ \underline{\Psi}_{x2}^{(1)} &= \underline{L}_{\sigma M}^{(1)} \dot{i}_{x2}^{(1)} + \underline{M}_M^{(1)} \dot{i}_{x1}^{(1)}; \\ \underline{\Psi}_{y2}^{(1)} &= \underline{L}_{\sigma M}^{(1)} \dot{i}_{y2}^{(1)} + \underline{M}_M^{(1)} \dot{i}_{y1}^{(1)}; \end{aligned} \right\} \quad (2.138)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{i}_{sM}^{(1)} &= \underline{M}_M^{(1)} + \underline{L}_{1M}^{(1)}; \quad \underline{L}_{2M}^{(1)} = \underline{M}_M^{(1)} + \underline{L}_{2M}^{(1)}; \\ \text{если } \underline{U}_1^{(1)} &\leq \underline{U}_H^{(1)} \text{ то } \underline{M}_M^{(1)} = \underline{M}_{M0}^{(1)}; \\ \text{если } \underline{U}_1^{(1)} &> \underline{U}_H^{(1)} \text{ то } \underline{M}_M^{(1)} = \underline{a}_1^{(1)} + \underline{\beta}_1^{(1)} \underline{U}_1^{(1)}; \\ \underline{U}_1^{(1)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\underline{U}_{x1}^{(1)})^2 + (\underline{U}_{y1}^{(1)})^2}; \end{aligned} \right\} (2.139)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{L}_{1M}^{(1)} &= \underline{a}_2^{(1)} + \underline{\beta}_2^{(1)} \underline{I}_1^{(1)}; \quad \underline{L}_{2M}^{(1)} = \underline{a}_3^{(1)} + \underline{\beta}_3^{(1)} \underline{I}_2^{(1)}; \\ \underline{I}_1^{(1)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\underline{i}_{x1}^{(1)})^2 + (\underline{i}_{y1}^{(1)})^2}; \quad \underline{I}_2^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\underline{i}_{x2}^{(1)})^2 + (\underline{i}_{y2}^{(1)})^2}, \end{aligned} \right\} (2.140)$$

где $\underline{L}_{sM}^{(1)} = \frac{L_{sM}^{(1)}}{L_\sigma}$; $\underline{L}_{2M}^{(1)} = \frac{L_{2M}^{(1)}}{L_\sigma}$; $\underline{L}_{1M}^{(1)} = \frac{L_{1M}^{(1)}}{L_\sigma}$; $\underline{L}_{2M}^{(1)} = \frac{L_{2M}^{(1)}}{L_\sigma}$; $\underline{U}_1^{(1)} = \frac{U_1^{(1)}}{U_H}$;
 $\underline{U}_H^{(1)} = \frac{U_H^{(1)}}{U_H}$; $\underline{M}_{M0}^{(1)} = \frac{M_{M0}^{(1)}}{L_\sigma}$; $\underline{I}_1^{(1)} = \frac{I_1^{(1)}}{I_H}$; $\underline{I}_2^{(1)} = \frac{I_2^{(1)}}{I_H}$; $\underline{a}_1^{(1)}, \underline{\beta}_1^{(1)}, \underline{a}_2^{(1)}, \underline{\beta}_2^{(1)}, \underline{a}_3^{(1)}, \underline{\beta}_3^{(1)}$ - постоянные коэффициенты.

Полученные системы (2.128)...(2.132) описывают электро-механические переходные процессы асинхронного двигателя в системе относительных единиц.

Уравнения связи (2.104), (2.105), (2.107) и условие (2.108) в относительных единицах запишутся так

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{x1}^{(1)} &= \underline{U}_{d0} - \underline{x}_1^{(1)} \underline{i}_{x1}^{(1)} - \frac{d\underline{\Psi}_{x1n}^{(1)}}{d\tau}; \\ \underline{U}_{y1}^{(1)} &= \underline{U}_{q0} - \underline{x}_2^{(1)} \underline{i}_{y1}^{(1)} - \frac{d\underline{\Psi}_{y1n}^{(1)}}{d\tau}; \end{aligned} \right\} (2.141)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{\Psi}_{x1n}^{(1)} &= \underline{L}_n^{(1)} \underline{i}_{x1}^{(1)}; \\ \underline{\Psi}_{y1n}^{(1)} &= \underline{L}_n^{(1)} \underline{i}_{y1}^{(1)}; \end{aligned} \right\} (2.142)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_{d0} &= \dot{i}_{x1}^{(1)} + n_g \dot{i}_{x1}^{(2)} ; \\ \dot{i}_{q0} &= \dot{i}_{y1}^{(1)} + n_g \dot{i}_{y1}^{(2)} ; \end{aligned} \right\} \quad (2.143)$$

если $\tau < \tau_s$ то

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_{x1}^{(1)} &= 0, \dot{i}_{y1}^{(1)} = 0, \dot{i}_{x2}^{(1)} = 0, \dot{i}_{y2}^{(1)} = 0 ; \\ n_g &= 0, 1, 2, 3, \dots, n-1, \end{aligned} \right\} \quad (2.144)$$

где $\psi_{x1n}^{(1)} = \frac{\psi_{x1n}^{(1)}}{\psi_B} ; \psi_{y1n}^{(1)} = \frac{\psi_{y1n}^{(1)}}{\psi_B} ; z_A^{(1)} = \frac{z_A^{(1)}}{z_B} ; l_A^{(1)} = \frac{l_A^{(1)}}{l_B}$.

Таким образом, системы (2.125)...(2.144) являются уравнениями переходных процессов системы автономного электропривода и позволяют изучить динамику системы в различных режимах работы с учетом взаимного влияния элементов - ДВС, СГ, асинхронные двигатели и рабочие органы.

При необходимости система уравнений дополняется уравнениями других асинхронных двигателей и механических характеристик их рабочих органов, аналогичных (2.138)...(2.140).

Если система электропривода включает в себя генератор другого типа, то соответствующими уравнениями, предварительно переведенными в систему относительных единиц, заменяются уравнения (2.128), (2.129), (2.133), (2.134).

Различные режимы работы системы моделируются путем подбора необходимых начальных условий и значений τ_1, \dots, τ_s .

Для конкретных расчетов уравнения системы подвергаем преобразованиям путем исключения из них потокосцеплений, т.е. за переменную состояния системы принимаем ток, поскольку другим путем записать систему в явном виде не удастся. Далее оптимизацию параметров элементов системы проводим, рассчитывая устойчивость системы различного рода возмущениям $Y_{B1} \dots Y_{B8}$, при режимах работы $Y_{P1} \dots Y_{P6}$. Результаты этой работы в книгу не вошли ввиду ограниченности ее объема.

Выводы

1. Работа системы автономного электропривода мобильной сельскохозяйственной машины является циклично-повторяющейся и содержит режимы возбуждения генератора, пуска двигателей, трогания агрегата с места, проведения технологического процесса, выключения двигателей и гашения поля генератора.

2. Выведены уравнения переходных процессов системы автономного электропривода в реальной системе координат и в системе координат d, q , учитывающие: характеристики ДВС; работу муфты сцепления трактора при трогания с места; особенности устройства основных типов генераторов автономного питания с самовозбуждением - наличие дополнительных обмоток, компаундирующего устройства и трехфазного выпрямителя в цепи возбуждения; насыщение магнитной цепи электрических машин и вытеснение тока в стержнях ротора асинхронного двигателя; падение напряжения в силовом кабеле. Уравнения позволяют моделировать все режимы работы системы автономного электропривода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т.3. - 6-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1982. - 576 с., ил.
2. Асинхронные двигатели общего назначения /Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковалев Ю.М. и др.; Под ред. В.М.Петрова и А.Э.Кравчика. - М.: Энергия, 1980. - 488 с., ил.
3. Атабеков В.Б., Михайловский Ю.В. Передвижные электростанции и электросварочные агрегаты. - М.: Высш.шк., 1978. - 352 с., ил.
4. Басов А.М., Шаповалов А.Т., Кожевников С.А. Основы электропривода и автоматическое управление электроприводом в сельском хозяйстве. - М.: Колос, 1972. - 344 с., ил.
5. Белоруссов Н.И. и др. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник. - 5 изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 536 с., ил.
6. Быстроходные поршневые двигатели внутреннего сгорания. Под ред. Н.Х.Дьяченко. - М.-Л.: Машгиз, 1962. - 259 с., ил.
7. Генераторы синхронные трехфазные серии ЕСС5. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. - 48 с., ил.
8. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. /Т.М.Башта, С.С.Руднев, Б.В.Некрасов и др. - 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с., ил.
9. Гидравлическое оборудование: Каталог-справочник: В 2-х ч. Ч. I, II: М.: Машиностроение, 1967. - 748 с., ил.
10. Гидравлическое, пневматическое, смазочное оборудование и фильтрующие устройства: Номенклатурный справочник. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: НИИ информации по машиностроению, 1971. - 244 с.
11. Важнов А.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. - Л.: Госэнергоиздат, 1980.
12. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. - Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. - 256 с., ил.
13. Васильченко В.А., Беркович Ф.М. Гидравлический привод строительных и дорожных машин. - М.: Стройиздат, 1987. - 166 с., ил.
14. Васильченко В.А. Гидравлическое оборудование мобильных машин: Справочник. - М.: Машиностроение, 1983. - 301 с., ил.

15. Гидропривод и гидрооборудование в станкостроении: Каталог.-М.:НИИ информации по машиностроению, 1980.-140с.
16. Гидроприводы сельскохозяйственных машин /И.А.Немировский, В.Маркин, Л.П.Середа, В.В.Яницкий; Под ред.И.А.Немировского-Киев.:Техніка, 1979.-138с., ил.
17. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины.- М.-Л.:Госэнергоиздат, 1950.-55с., ил.
18. Грамп Е.А. и др. Опыт использования ФСА в промышленности США.-М.:Информэлектро, 1978.
19. Гуткин А.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества.-М.:Сов.радио, 1975.-368с., ил.
20. Гузенков П.Г. Детали машин.-4-е изд., испр.-М.:Высш.шк. 1986.-359с., ил.
21. Двигатели внутреннего сгорания. Т.3. Системы регулирования. Автоматизация. Под общей ред. А.С.Ордина, -М.:Машгиз, 1962.-308с., ил.
22. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин.- Л.:Энергия, 1976.-248с., ил.
23. Ерошенко Г.П. Эксплуатационные свойства электрооборудования.-Изд-во Саратов.ун-та, 1983.-180 с., ил.
24. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока.-М.-Л.:Изд-во АН СССР, 1962.-362с., ил.
25. Карабанов Ф.М., Суслов П.И. Учебное пособие водителя электромеханика подвижных агрегатов электропитания.Изд.2-е.- М.:ДОСААФ, 1975.-142с., ил.
26. Карпунин М.Г., Кузьмин А.М., Шалденков С.В. Функционально-стоимостной анализ в инженерной деятельности.-М.:Информэлектро, 1980.-77с., ил.
27. Кешуов С.А. Актуальные вопросы разработки мобильных электрифицированных сельскохозяйственных машин.:Электропривод и электронагрев в сельскохозяйственном производстве. Тематич. сб. научн. трудов.-Алма-Ата, 1986, с.3-6.
28. Кешуов С.А. Дифференциальное уравнение движения дизеля мобильного энергетического средства. - Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана, 1993, №1-2, с.38-41.

29. Кешуов С.А. Исследование нагрузочных диаграмм асинхронных двигателей при периодической нагрузке. :Вопросы электрификации сельскохозяйственного производства Казахстана. Тематич. сб. научн. трудов. -Алма-Ата, 1982, с. 92-97.

30. Кешуов С.А. Математическое моделирование цепи обмотки возбуждения синхронного генератора автономной системы электропривода. :Повышение эффективности процессов механизации и электрификации сельскохозяйственного производства. Тематич. сб. научн. трудов. -Алма-Ата, 1992, с. 103-111.

31. Кешуов С.А. Электрифицированная ручная косилка. :Информ-листок №152-92. КазНИИНКИ, 1992. -6с.

32. Кешуов С.А., Акбердин Н.А. Малогабаритная ручная косилка с электромагнитным приводом рабочего органа:Тезисы докладов II Всесоюзной научно-технической конференции "Энергосберегающее электрооборудования для АПК" - Москва, Информэлектро, 1990, с. 102.

33. Кешуов С.А. и др. Разработать и провести хозяйственную проверку электропривода мобильной установки для ухода за садовыми насаждениями. -Алма-Ата, 1985. -63с. - Рукопись представлена КазСХИ, Деп. в ВНИИЦ 10 декабря 1987, №01850030130.

34. Кешуов С.А., Жидебаев К.Ж. Комплект электрифицированного инструмента для обрезки плодовых деревьев. :Информ-листок №139-92, КазНИИНКИ. -5с.

35. Кешуов С.А., Проходцев В.С. Мобильное энергетическое средство. :Информ-листок №149-92. КазНИИНКИ, 1992. -3с.

36. Кешуов С.А., Проходцев В.С. Результаты разработки электрифицированного контурного обрезчика крон плодовых культур. : Электрооборудование и электробезопасность в сельскохозяйственном производстве. Тематич. сб. научн. трудов. -Алма-Ата, 1988, с. 3-5.

37. Кешуов С.А., Проходцев В.С. Уравнения переходных процессов синхронного генератора мобильного энергетического средства. :Электропривод и электронагрев в сельскохозяйственном производстве. Тематич. сб. научн. трудов-Алма-Ата, 1986, с. 6-17

38. Кешуов С.А., Проходцев В.С. Электрифицированный контурный обрезчик. :Наука производству. -Алма-Ата, 1987, с. 53.

39. Кешуов С.А., Проходцев В.С. Электрифицированный контурный обрезчик крон плодовых культур. :Рекомендации по законченным

научно-исследовательским работам за XI пятилетку (механизация, животноводство, экономика). - Алма-Ата, 1987, с. 54-55.

40. Кешуов С.А., Проходцев В.С., Чуканов М.Г. Электрифицированный контурный обрезчик для интенсивных садов. Информ-листок №146-92. КазНИИИКИ, 1992. - 3с.

41. Кешуов С.А., Чуканов М.Г., Проходцев В.С. Контурный обрезчик плодовых культур с электроприводом рабочих органов. : Ресурсосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве на основе электрифицированных процессов. Тезисы докладов. - Челябинск, 1986, с. 51.

42. Костин А.К. Характеристики двигателей внутреннего сгорания. Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина. - 1959.

43. Лайбль Т. Теория синхронной машины при переходных процессах. - М.: Госэнергоиздат, 1957. - 168 с., ил.

44. Лейдерман С.Р. Характеристики автомобильных двигателей. - Автотракторная промышленность, 1948, №9.

45. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. - М.: Наука, 1981. - 488с.

46. Моисеева Н.К., Курпунин М.Г. Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа. - М.: Высш. шк., 1988, - 192с., ил.

47. Надежность гидравлических систем воздушных судов. /Т.М. Башта, В.Д. Бабанская, Ю.С. Головки и др.; Под ред. Т.М. Башты. - М.: Транспорт, 1986. - 279 с., ил.

48. Надежность кабелей и проводов для радиоэлектронной аппаратуры /Е.В. Быков и др.; Под ред. Л.И. Кранихфельда и И.Б. Пешкова. - М.: Энергоиздат, 1982. - 200 с., ил.

49. Объемные гидравлические приводы /Башта Т.М., Зайченко И. З., Ермаков В.В., Хаймович Е.М.; Под ред. Т.М. Башты. - М.: Машиностроение, 1968. - 628с., ил.

50. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. - М.: Энергоиздат, 1981. - 184с., ил.

51. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. - М.: Высш. школа, 1975. - 319с., ил.

52. Приводы машин. Справочник /В.В. Длоугий, Т.И. Муха, А.П. Цупиков, Б.В. Януш; Под общ. ред. В.В. Длоугого. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982, - 383с., ил.

53. Проектирование механических передач. /С.А.Чернавский, Г.А.Снесарев, Б.С.Козинцев и др. -5-е изд., перераб. и доп. -М.: Машиностроение, 1984. -560 с., ил.
54. Пястолов А.А., Ерошенко Г.П. Эксплуатация электрооборудования. -М.: Агропромиздат, 1990. -287с.: ил.
55. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. -М.: Изд-во иностранной литературы, 1955, -714с. ил.
56. Саркисян С.А., Ахундов В.М., Минаев Э.С. Большие технические системы. Анализ и прогноз развития. -М.: Наука, 1977-350с., ил.
57. Сельскохозяйственная техника. Каталог. Т. I, II, III. Издание шестое, перераб. и доп. Под общей редакцией В.И.Черноиванова. М.: 1992.
58. Сергеев П.С. и др. Проектирование электрических машин. Изд. 3-е, перераб. и доп. -М.: Энергия, 1969. -632с., ил.
59. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин (АВМ) - М.: Высш. школа, 1980. -176 с., ил.
60. Системный анализ и структуры управления /Под общей ред. В.Г.Шорина. -М.: Знание, 1975. -305с., ил.
61. Соколов М.М., Петров П.П., Масандилов Л.В., Ладензон В.А. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. -М.: Энергия, 1967. -200с., ил.
62. Справочная книга по охране труда в машиностроении. /Г.В.Бектобеков, Н.Н.Борисова, В.И.Коротков и др.: Под общей ред. О.Н.Русака. -Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1989. -541с., ил.
63. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. -М.: Наука, 1981. -720с., ил.
64. Справочник по функционально-стоимостному анализу. /Под ред. М.Г.Карпунина, В.И.Майданчика. -М.: Финансы и статистика, 1988. -431с., ил.
65. Справочник по электрическим машинам: В 2т. /Под общ. ред. И.П.Копылова и Б.К.Клокова. Т. I. -М.: Энергоатомиздат, 1988. -456с., ил.
66. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам /Я.М.Вильнер, Я.Т.Ковалев, Б.В.Некрасов и др.; Под общ. ред. Б.В.Некрасова. -2-е изд., перераб. и доп. -Мн.: Высш. шк., 1985, -382с., ил.

67. Страхов С.В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока. -М.Л.:Госэнергоиздат, 1969. -247с., ил.

68. Сырицын Т.А. Эксплуатация и надежность гидро-и пневмоприводов. -М.:Машиностроение, 1990. -248с., ил.

69. Теоретические основы электротехники. В 3-х ч. Ч. I. Атабеков Г.И., Линейные электрические цепи. -5-е изд. перераб. и доп., -М.:Энергия, 1978. -592с., ил.

70. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин. /Е.С.Босой, О.В.Верняев, И.И.Смирнов, Е.Г.Султан-Шах: Под ред. Е.С.Босого. -2-е изд. перераб. и доп. -М.:Машиностроение, 1977. -588с., ил.

71. Теория прогнозирования и принятия решений /Под ред. С.А.Саркисяна. -М.:Высш.шк., 1977. -350с., ил.

72. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки, ГОСТ 23728-88-ГОСТ 23730-88. Государственный комитет СССР по стандартам. М., 1988.

73. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока. -Л.:Энергия, Ленинг.отд-ние, 1980. -344с., ил.

74. Тяговые характеристики сельскохозяйственных тракторов. Альбом-справочник. -М.:Россельхозиздат, 1979, -240с., ил.

75. Фоменков А.П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий. -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Колос, 1984. -288с., ил.

76. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. -6-е изд., перераб. и доп. -М.:Энергоиздат, 1981. -576 с., ил.

77. Чудаков Д.А. Основы теории расчета трактора и автомобиля. Изд. 2-е, перераб. и доп. -М.:Колос, 1972. -384с., ил.

78. Электрические системы /Под ред. В.А.Веникова, -М.:Высш.шк., 1974. -327с., ил.

79. Элементы гидропривода:Справочник /Е.И.Абрамов, К.А.Колесниченко, В.Т.Маслов. -2-е изд., перераб. и доп. -Киев:Техніка, 1977. -320с., ил.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I

Таблица П1.1

Результаты расчета системы электропривода промышленной частоты $S_{э1}$ при $Y_u = \{ \phi = \phi_{бр}, P = 3 \text{ кВт}, \ell = 6,5 \text{ м}, n = 1 \}$.

Элемент, комплект	Тип	$\lambda(t), 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	$\rho_{э1}$	$m_{э1}, \text{ кв}$
Генератор	ГАБ-4- $\frac{T}{400}$ -М1	200	0,80	50,0
Муфта	-	8	-	2,4
Карданный вал	-	7	-	4,5
Редуктор	-	2,4	0,95	15,0
Площадка генератора	-	-	-	15,0
Магнитный пускатель	ПМЕ-122	0,1	-	1,8
Кнопки управления	КМЕ 4120 УЗ	-	-	0,4
Проводка	ПВ I	-	-	0,5
ЗОУП	ЗОУП-25	0,9	-	1,1
Кабель.	КРПСН(3x2,5+1x1,5)	0,553	1,00	4,9
Электродвигатель	4А100 4СХУЗ	10	0,82	35,5
Площадка электродвигателя	-	-	-	8
Итого:	-	228,953	0,62	139,1

Примечания:

1. Сечение кабеля, предварительно выбранное по допустимому току, проверяем по допустимой потере напряжения $\Delta U_{\text{ген}} = 20\text{В}$, найденного из возможного диапазона регулирования напряжения генератора

$$\Delta U = \sqrt{3}(\gamma_0 \cos \varphi + \chi_0 \sin \varphi) I_p \ell \cdot 10^{-3} = 0,47\text{В}, \quad (\text{III.1})$$

$$\Delta U = 0,47 < \Delta U_{\text{ген}} = 20\text{В}, \quad (\text{III.2})$$

где $\gamma_0 = 7,41\text{ Ом/км}$, $\chi_0 = 0,0979\text{ Ом/км}$ – активное и реактивное удельные сопротивления жилы кабеля; $I_p = 6,7\text{ А}$ – рабочий ток двигателя; $\varphi = 33,9^\circ$ – угол сдвига начальной фазы тока и напряжения двигателя/5,65/.

2. Интенсивность отказов системы /22,48/

$$\lambda_{\text{н}}(t) = \sum \lambda_i(t) = 228,953 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1},$$

вероятность безотказной работы

$$p_{\text{н}}(t) = e^{-t_u \lambda_{\text{н}}(t)} = 0,72, \quad (\text{III.3})$$

где $t_u = 1440\text{ ч}$ – число часов использования системы в году.

3. К.п.д. кабельной линии

$$\eta_{\text{к}} = 1 - \frac{\Delta U}{U_1} = 1,00, \quad (\text{III.4})$$

где $U_1 = 380\text{ В}$ – напряжение в начале линии.

К.п.д. системы

$$\eta_{\text{д1}} = \eta_{\text{р1}} \eta_{\text{д}} \eta_{\text{г}} \eta_{\text{к}} = 0,62. \quad (\text{III.5})$$

Продолжение

Таблица П. I. 2

Результаты расчета системы электропривода
повышенной частоты S_{22} при $U_c = \{ \Phi = \Phi_{8p},$
 $P = 3 \text{ кВт}, \ell = 6,5 \text{ м}, n = 1 \}$.

Элемент, комплект	Тип	$\lambda_{22}(t),$ 10^{-6} ч^{-1}	ϱ_{22}	$m_{22}, \text{ кг}$
Генератор	Специализиров.	200	0,74	4,4
Муфта	-	8	-	1,6
Карданный вал	-	7	-	4,5
Редуктор	-	2,4	0,95	25
Площадка генератора	-	-	-	3
Магнитный пускатель	ПМЕ - 222	0,1	-	2,8
Кнопка управления	КМЕ 4120У3	-	-	0,4
Проводка	ПВ I	-	-	0,5
ЗОУП	ЗОУП-25	0,9	-	1,1
Кабель	КРПСН (3x2,5+ +1x1,5)	0,553	1,00	4,9
Электродвигатель	Специализиров.	10	0,76	3,3
Площадка эл. двигателя	-	-	-	1,5
Итого:	-	228,953	0,53	53,0

Результаты расчета системы объемного гидропривода S_r при $Y_u = \{\Phi = \Phi_{sp}, P = 3 \text{ квт}, \ell = 6.5 \text{ м}, n = 1\}$.

Элемент, комплект	Тип	$\lambda_r(t), 10^{-6} \nu^{-1}$	ϕ_r	$m_r, \text{ кв}$
Гидронасос	МНШ-32У	13	0,78	5,3
Муфта	-	8	-	2,4
Карданный вал	-	7	-	4,5
Редуктор	-	2,4	-	15
Площадка насоса	-	-	-	7,0
Гидроаккумулятор	50-4609065	2,4	-	1,2
Манометр	МП4-VI	3,5	-	0,5
Гидрораспределитель	P20I60-20-0I-30	2,6	-	12,8
Масляный фильтр	I.I.32-55 Элемент 642-I-05	0,4	-	9,7
Гидробак	-	1,5	-	6,3
Фильтр всасывающий	C4I-I3	-	-	2,3
Фильтр заливной	I.I.25-25 Элемент 640-I-05	-	-	8
Сапун	ОСТ 22-1289-80	-	-	0,5
Всасывающая линия	Рукав ИЛ-25-80/50- У ГОСТ 6286-73	2,56	-	1,2
Напорная линии	Труба 15x0,5 ГОСТ 8734-75 и ГОСТ 8733-74 Рукав ИИ-16- 200 ГОСТ 6286-73	9,02	-	2,1
Сливная линия	Труба 21x0,5 ГОСТ 8734-75 и ГОСТ 8733-74 Рукав ИЛ-20- -90/55 у ГОСТ 6286-73	8,48	-	2,5
Гидромотор	МНШ-32У	4,3	0,72	5,3
Площадка гидро- мотора	-	-	-	6,0
Масло	МГ-30(летнее)	-	-	84,1
Итого:	-	65,16	0,51	176,7

Примечания:

I. Диаметр напорного трубопровода

$$d = 4,6 \sqrt{\frac{Q}{u_{\text{доп}}}} = 13,9 \text{ мм}, \quad (\text{П. I. 6})$$

где $Q = 36,4$ л/мин - подача насоса; $u_{\text{доп}} = 4$ м/с - допустимая скорость течения гидравлической жидкости. Ближайший стандартный диаметр трубы $d_{\text{ст}} = 14$ мм / 9, 10, 15, 79/.

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{u \cdot d_{\text{ст}}}{\nu} 10^{-3} = 1965, \quad (\text{П. I. 7})$$

где $u = 4,6^2 Q / d_{\text{ст}}^2 = 3,93$ м/с - действительная скорость масла; $\nu = 2,8 \cdot 10^{-6}$ м/с² - вязкость масла. Критическое значение числа Рейнольдса для круглой гладкой трубы $Re_{\text{кр}} = 2300$, тогда $Re < Re_{\text{кр}}$ и коэффициент сопротивления

$$\lambda = \frac{75}{Re} = 38,2 \cdot 10^{-3}. \quad (\text{П. I. 8})$$

Потери давления по длине гидрوليнии

$$\Delta p_{\text{нап}} = \lambda \frac{\ell u^2}{2 d_{\text{ст}}} \rho = 0,122 \text{ МПа}, \quad (\text{П. I. 9})$$

где $\rho = 890$ кг/м³ - плотность гидравлической жидкости.

Толщина стенки трубы

$$\delta = \frac{p_{\text{нас}} d_{\text{ст}} n_B}{2 \sigma_B} = 0,48 \text{ мм}, \quad (\text{П. I. 10})$$

где $p_{\text{нас}} = 10$ МПа - номинальное давление на выходе насоса; $n_B = 3$ - коэффициент запаса прочности; $\sigma_B = 436$ МПа - допустимое напряжение стальной трубы на разрыв. С учетом возможности внешних механических повреждений $\delta_{\text{ст}} = 0,5$ мм.

Потери давления в гидрораспределителе

$$\Delta p_r = \Delta p_{rH} \left(\frac{Q}{Q_{rH}} \right)^2 = 0,086 \text{ МПа}, \quad (\text{П. I. 11})$$

где $\Delta p_{rH} = 0,065$ МПа - номинальные потери давления выбранного гидрораспределителя; $Q_{rH} = 100$ л/мин - номинальный расход гидрораспределителя.

Потери давления на местах соединения обратного клапана и гидроаккумулятора

$$\Delta p_c = \xi \rho u^2 = 0,001 \text{ МПа}, \quad (\text{П. I. I2})$$

где $\xi = 0,1$ - коэффициент сопротивления.

Местные потери $\Delta p_m = \Delta p_r + \Delta p_c = 0,087$ МПа, суммарные потери в напорном трубопроводе

$$p_1 - p_2 = \Delta p_{\text{нап}} + \Delta p_m = 0,209 \text{ МПа}. \quad (\text{П. I. I3})$$

Допустимые потери давления в напорном трубопроводе

$$\Delta p_{\text{доп}} = p_{\text{нас}} - p_{\text{мот}} = 3 \text{ МПа}, \quad (\text{П. I. I4})$$

где $p_{\text{мот}} = 7$ - номинальное давление на входе гидромотора.

Следовательно

$$p_1 - p_2 = 0,209 \text{ МПа} < \Delta p_{\text{доп}} = 3 \text{ МПа}. \quad (\text{П. I. I5})$$

Для присоединения трубопровода к насосу и гидромотору используем резиновые рукава.

Сливная и всасывающая гидролинии рассчитываются аналогично, соответственно при $u_{\text{доп}} = 2$ и $1,2$ м/с.

2. Объем жидкости в гидробаке определяется как

$$V = (2 \dots 3) p_{\text{нас}} \quad (\text{П. I. I6})$$

3. Вероятность безотказной работы системы

$$p_r(t) = e^{-t_u \lambda_r(t)} = 0,910. \quad (\text{П. I. I7})$$

4. К.п.д. гидролинии

$$\eta_n = 1 - \frac{\Delta p_n}{\Delta p_1} = 0,97, \quad (\text{П. I. I8})$$

где $\Delta p_n = \Delta p_{\text{нап}} + \Delta p_c + \Delta p_g = 0,335$ МПа - суммарные потери давления в системе; $\Delta p_c = 0,122$ МПа, $\Delta p_g = 0,004$ МПа - потери давления в сливной и всасывающей линиях; $\Delta p_1 = \Delta p_{\text{мот}} + \Delta p_n = 7,335$ МПа - перепад давления в гидронасосе.

К.п.д. гидросистемы

$$\eta_r = \eta_{p1} \eta_{zH} \eta_{zM} \eta_n = 0,509. \quad (\text{П. I. I9})$$

Продолжение

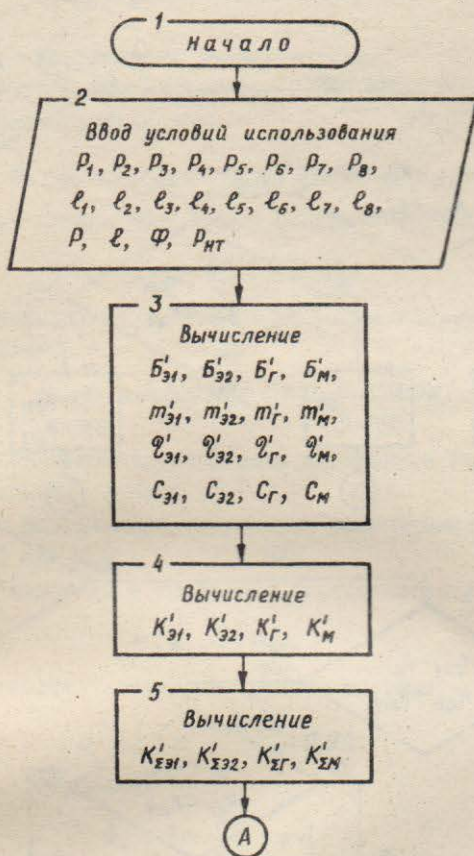
Таблица П.1.4

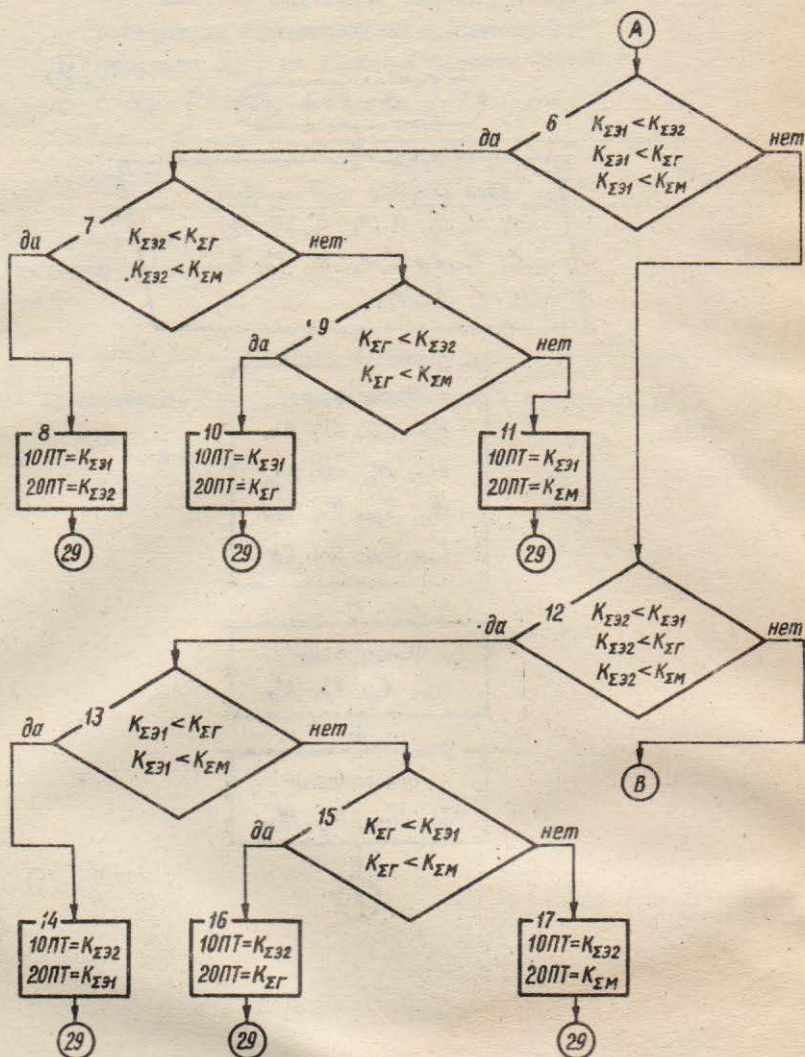
Показатели эффективности механической передачи S_M , на примере косилки КРН-2, I с $U_4 = \{\Phi = \Phi_{вр}, P = 37 \text{ кВт}, l = 1,4 \text{ м}, n = 1\}$.

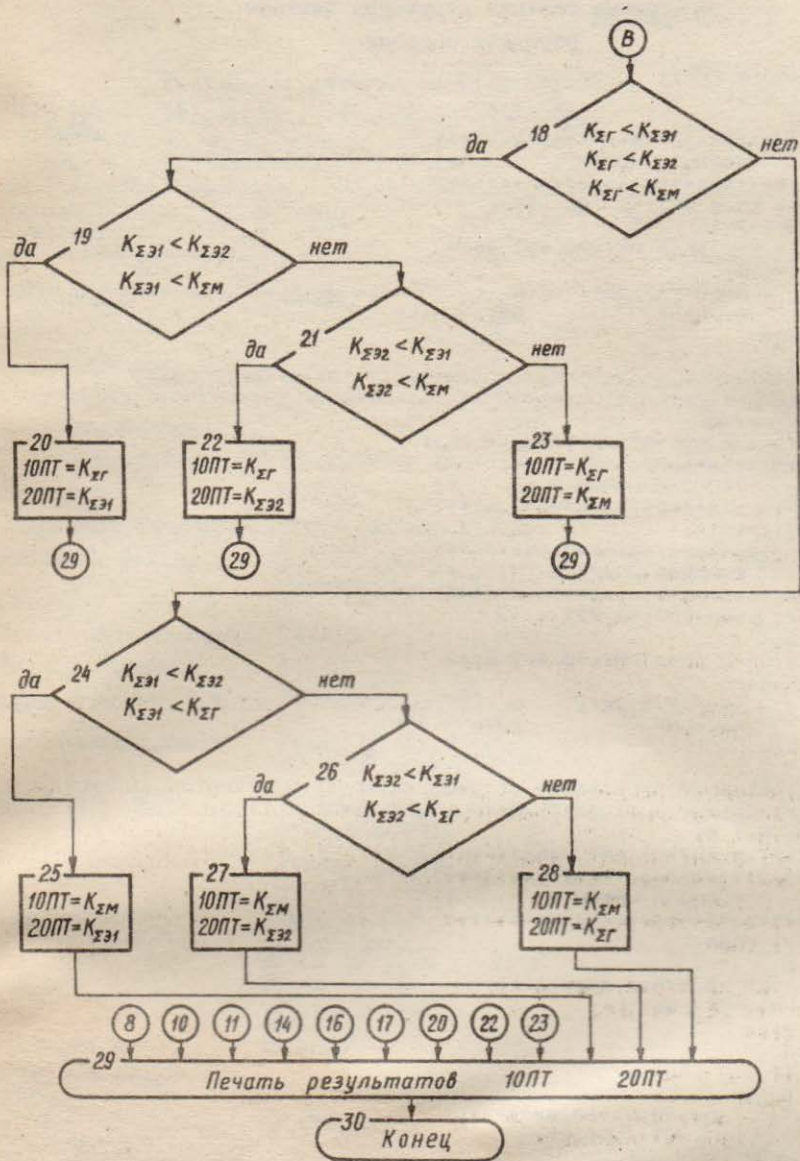
Комплект	$\lambda_M(t),$ 10^{-6} ч^{-1}	Q_M	$m_M, \text{ кг}$
Карданный вал	7	-	6,5
Ременная передача	77,5	0,93	32,8
Итого	84,5	0,93	39,3

Примечание: Вероятность безотказной работы $P_M(t) = e^{-t_4 \lambda_M(t)} = 0,89$.

Алгоритм синтеза структуры системы
передачи энергии







Программа синтеза структуры системы
передачи энергии

```

Procedure Koff;
Label Exit;
Begin
  (*****)
  (*   ФОРМУЛА НОМЕР 1   *)
  (*****)
  If F=1 then PGT:=0.985 else
  Begin
    If F=2 then PGT:=0.983 else
    Begin
      GotoXY(3,25);   Write('Ошибочный F = ',F,' Нажмите ВВОД')
      ReadLN;         Goto Exit;
    End;
  End;
  rab1:=ST(PK1T,L1)*ST(PK1T,L2)*ST(PK1T,L3)*ST(PK1T,L4);
  rab1:=rab1*ST(PK1T,L5)*ST(PK1T,L6)*ST(PK1T,L7)*ST(PK1T,L8);
  rab2:=N*1.0;
  P131T:=1.0-P2T*ST(PGT,rab2)*rab1;
  (*****)
  (*   ФОРМУЛА НОМЕР 2   *)
  (*****)
  P132T:=P131T;
  (*****)
  (*   ФОРМУЛА НОМЕР 3   *)
  (*****)
  If F=1 then PMT:=0.992 else
  Begin
    If F=2 then PMT:=0.982 else
    Begin
      GotoXY(3,25);   Write('Ошибочный F = ',F,' Нажмите ВВОД')
      ReadLN;         Goto Exit;
    End;
  End;
  rab1:=ST(PL1T,2*L1)*ST(PL1T,2*L2)*ST(PL1T,2*L3)*ST(PL1T,2*L4);
  rab1:=rab1*ST(PL1T,2*L5)*ST(PL1T,2*L6)*ST(PL1T,2*L7)*ST(PL1T,2*L8);
  rab2:=N*1.0;
  P1GT:=1.0-PHT*ST(PMT,rab2)*rab1;
  (*****)
  (*   ФОРМУЛА НОМЕР 4   *)
  (*****)
  If F=1 then
  Begin
    rab1:=0.978+0.000054*P;
    PMT:=ST(rab1,L);
  End else
  Begin
    If F=2 then
    Begin
      rab1:=0.977+0.000054*P;
      PMT:=ST(rab1,L);
    End;
  End;
  P1MT:=1.0-PMT;

```

```
(*****)  
(*      ФОРМУЛА НОМЕР 5      *)  
(*****)  
If F=1 then RN:=1.0 else RN:=0.85;  
If P>75.0 then RR:=0.91 else RR:=0.75+0.04381*ST(P,0.3);  
If PM1>22.0 then RG1:=A3 else RG1:=A1+A2*ST(PM1,0.7);  
RK1:=1.0-A4*L1;  
RG2:=0.0;      RK2:=0.0;      RG3:=0.0;      RK3:=0.0;      RG4:=0.0;  
RG5:=0.0;      RK5:=0.0;      RG6:=0.0;      RK6:=0.0;      RG7:=0.0;  
RG8:=0.0;      RK8:=0.0;      RK4:=0.0;  
If N>=2 then      RK7:=0.0;  
Begin  
  If PM2>22.0 then RG2:=A3 else RG2:=A1+A2*ST(PM2,0.7);  
  RK2:=1.0-A4*L2;  
End;  
If N>=3 then  
Begin  
  If PM3>22.0 then RG3:=A3 else RG3:=A1+A2*ST(PM3,0.7);  
  RK3:=1.0-A4*L3;  
End;  
If N>=4 then  
Begin  
  If PM4>22.0 then RG4:=A3 else RG4:=A1+A2*ST(PM4,0.7);  
  RK4:=1.0-A4*L4;  
End;  
If N>=5 then  
Begin  
  If PM5>22.0 then RG5:=A3 else RG5:=A1+A2*ST(PM5,0.7);  
  RK5:=1.0-A4*L5;  
End;  
If N>=6 then  
Begin  
  If PM6>22.0 then RG6:=A3 else RG6:=A1+A2*ST(PM6,0.7);  
  RK6:=1.0-A4*L6;  
End;  
If N>=7 then  
Begin  
  If PM7>22.0 then RG7:=A3 else RG7:=A1+A2*ST(PM7,0.7);  
  RK7:=1.0-A4*L7;  
End;  
If N>=8 then  
Begin  
  If PM8>22.0 then RG8:=A3 else RG8:=A1+A2*ST(PM8,0.7);  
  RK8:=1.0-A4*L8;  
End;  
rab1:=RK1+RK2+RK3+RK4+RK5+RK6+RK7+RK8;  
rab2:=RG1+RG2+RG3+RG4+RG5+RG6+RG7+RG8;  
rab3:=rab1*rab2*RP1*RR;  
R131:=1.0-rab3*RN/(N*N);  
(*****)  
(*      ФОРМУЛА НОМЕР 6      *)  
(*****)  
rab3:=rab1*rab2*RP2*RR;  
R132:=1.0-rab3*RN/(N*N);
```



```

(*****)
(*   ФОРМУЛА НОМЕР 7   *)
(*****)
If P>35.0 then RH:=0.83 else RH:=0.71+0.041*ST(P,0.3);
RM1:=0.0; RN1:=0.0; RM2:=0.0; RN2:=0.0; RM3:=0.0; RN3:=0.0;
RM4:=0.0; RN4:=0.0; RM5:=0.0; RN5:=0.0; RM6:=0.0; RN6:=0.0;
RM7:=0.0; RN7:=0.0; RM8:=0.0; RN8:=0.0;
RN1:=A9-A10*L1;
If F=1 then
Begin
  if PM1>35.0 then RM1:=A7 else RM1:=A5+A6*ST(PM1,0.3);
End else RM1:=A8;
If N>=2 then
Begin
  RN2:=A9-A10*L2;
  If F=1 then
  Begin
    if PM2>35.0 then RM2:=A7 else RM2:=A5+A6*ST(PM2,0.3);
  End else RM2:=A8;
End;
If N>=3 then
Begin
  RN3:=A9-A10*L3;
  If F=1 then
  Begin
    if PM3>35.0 then RM3:=A7 else RM3:=A5+A6*ST(PM3,0.3);
  End else RM3:=A8;
End;
If N>=4 then
Begin
  RN4:=A9-A10*L4;
  If F=1 then
  Begin
    if PM4>35.0 then RM4:=A7 else RM4:=A5+A6*ST(PM4,0.3);
  End else RM4:=A8;
End;
If N>=5 then
Begin
  RN5:=A9-A10*L5;
  If F=1 then
  Begin
    if PM5>35.0 then RM5:=A7 else RM5:=A5+A6*ST(PM5,0.3);
  End else RM5:=A8;
End;
If N>=6 then
Begin
  RN6:=A9-A10*L6;
  If F=1 then
  Begin
    if PM6>35.0 then RM6:=A7 else RM6:=A5+A6*ST(PM6,0.3);
  End else RM6:=A8;
End;

```

```

If N>=7 then
Begin
  RN7:=A9-A10*L7;
  If F=1 then
  Begin
    if PM7>35.0 then RM7:=A7 else RM7:=A5+A6*ST(PM7,0.3);
  End else RM7:=A8;
End;
If N>=8 then
Begin
  RN8:=A9-A10*L8;
  If F=1 then
  Begin
    if PM8>35.0 then RM8:=A7 else RM8:=A5+A6*ST(PM8,0.3);
  End else RM8:=A8;
End;
rab1:=RM1+RM2+RM3+RM4+RM5+RM6+RM7+RM8;
rab2:=RN1+RN2+RN3+RN4+RN5+RN6+RN7+RN8;
rab3:=rab1*rab2*RP1*RH;
RIG:=1.0-rab3/(N*N);
(*****
(* ФОРМУЛА HOMEP 8 *)
*****)
RIM:=1.0-RN*ST(0.958,L);
(*****
(* ФОРМУЛА HOMEP 9 *)
*****)
M21:=76.6*ST(P,0.6);
rab1:=ST(PM1,0.7)+ST(PM2,0.7)+ST(PM3,0.7)+ST(PM4,0.7);
rab2:=ST(PM5,0.7)+ST(PM6,0.7)+ST(PM7,0.7)+ST(PM8,0.7);
B1:=rab1+rab2;
If F=2 then
Begin
  A11:=34.2;
  MG1:=A11*B1;
End Else
Begin
  If PM1>10.0 then Begin A111:=27.8; B11:=0.7; End
  Else Begin A111:=11.9; B11:=1.0; End;
  If PM2>10.0 then Begin A112:=27.8; B12:=0.7; End
  Else Begin A112:=11.9; B12:=1.0; End;
  If PM3>10.0 then Begin A113:=27.8; B13:=0.7; End
  Else Begin A113:=11.9; B13:=1.0; End;
  If PM4>10.0 then Begin A114:=27.8; B14:=0.7; End
  Else Begin A114:=11.9; B14:=1.0; End;
  If PM5>10.0 then Begin A115:=27.8; B15:=0.7; End
  Else Begin A115:=11.9; B15:=1.0; End;
  If PM6>10.0 then Begin A116:=27.8; B16:=0.7; End
  Else Begin A116:=11.9; B16:=1.0; End;
  If PM7>10.0 then Begin A117:=27.8; B17:=0.7; End
  Else Begin A117:=11.9; B17:=1.0; End;
  If PM8>10.0 then Begin A118:=27.8; B18:=0.7; End
  Else Begin A118:=11.9; B18:=1.0; End;

```



```

MG1:=A111*ST(PM1,B11)+A112*ST(PM2,B12)+A113*ST(PM3,B13)+A114
      *ST(PM4,B1)
MG1:=MG1+A115*ST(PM5,B15)+A116*ST(PM6,B16)+A117*ST(PM7,B17)
      +A118*ST(PM

```

```

End;
rab1:=ST(PM1,0.6)+ST(PM2,0.6)+ST(PM3,0.6)+ST(PM4,0.6);
rab2:=ST(PM5,0.6)+ST(PM6,0.6)+ST(PM7,0.6)+ST(PM8,0.6);
B8:=rab1+rab2;
rab1:=PM1*L1+PM2*L2+PM3*L3+PM4*L4;
rab2:=PM5*L5+PM6*L6+PM7*L7+PM8*L8;
B2:=rab1+rab2;
MK1:=0.06414*B2;
M131:=0.001*(M21+MG1+MK1);
{*****}
{*      ФОРМУЛА HOMEP 10      *}
{*****}
M22:=14.2*ST(P,0.6);
If F=1 then A12:=5.6 else A12:=10.6;
MG2:=A12*B1;
MK2:=0.117*B2;
M132:=0.001*(M22+MG2+MK2);
{*****}
{*      ФОРМУЛА HOMEP 11      *}
{*****}
rab1:=ST(PM1,0.7)*L1+ST(PM2,0.7)*L2+ST(PM3,0.7)*L3+ST(PM4,0.7)*L4;
rab2:=ST(PM5,0.7)*L5+ST(PM6,0.7)*L6+ST(PM7,0.7)*L7+ST(PM8,0.7)*L8;
B3:=rab1+rab2;
rab1:=ST(PM1,0.3)*L1+ST(PM2,0.3)*L2+ST(PM3,0.3)*L3+ST(PM4,0.3)*L4;
rab2:=ST(PM5,0.3)*L5+ST(PM6,0.3)*L6+ST(PM7,0.3)*L7+ST(PM8,0.3)*L8;
B4:=rab1+rab2;
If F=1 then
Begin
  MH1:=26.14*ST(P,0.6);
  MM:=3.83*B8;
  MMB:=30.7*ST(P,0.8);
  MLH:=0.14*B3;
  MLC:=0.24*B4;
  MMH:=0.072*B3;
  MMC:=0.14*B3;
  M16:=0.001*(MH1+MM+MLH+MLC+MMB+MMH+MMC);
End else
Begin
if P>PM16 then AG:=1.0 else AG:=0.0;
MH2:=AG*17.13*ST(P,0.7);
MGS:=12.99*B8;
rab1:=ST(PM1,0.6)*L1+ST(PM2,0.6)*L2+ST(PM3,0.6)*L3+ST(PM4,0.6)*L4;
rab2:=ST(PM5,0.6)*L5+ST(PM6,0.6)*L6+ST(PM7,0.6)*L7+ST(PM8,0.6)*L8;
ML:=0.31*(rab1+rab2);
MM:=0.49*B3;
M16:=0.001*(MH2+MGS+ML+MM);
End;
{*****}
{*      ФОРМУЛА HOMEP 12      *}
{*****}

```

```

if F=1 then AM:=0.0 else AM:=1.0;
rab1:=AM*(20.0*N+2.0*B1);
M1M:=0.001*(20.3+4.50*ST(P,0.7)*L+rab1);
{*****}
(*      ФОРМУЛА НОМЕР 13      *)
{*****}
if F=1 then
Begin
  A13:=51.3;      A14:=0.82;      A15:=-0.51;
End else
Begin
  A13:=84.61;    A14:=1.22;      A15:=-0.85;
End;
rab1:=ST(PM1,0.35)*L1+ST(PM2,0.35)*L2+ST(PM3,0.35)*L3+ST(PM4,0.35)*L4;
rab2:=ST(PM5,0.35)*L5+ST(PM6,0.35)*L6+ST(PM7,0.35)*L7+ST(PM8,0.35)*L8;
B5:=rab1+rab2;
C21:=182.7*ST(P,0.2);
rab1:=ST(PM1,0.4)+ST(PM2,0.4)+ST(PM3,0.4)+ST(PM4,0.4);
rab2:=ST(PM5,0.4)+ST(PM6,0.4)+ST(PM7,0.4)+ST(PM8,0.4);
CGK1:=A13*(rab1+rab2);
rab1:=ST(PM1,0.4)*L1+ST(PM2,0.4)*L2+ST(PM3,0.4)*L3+ST(PM4,0.4)*L4;
rab2:=ST(PM5,0.4)*L5+ST(PM6,0.4)*L6+ST(PM7,0.4)*L7+ST(PM8,0.4)*L8;
CGK1:=CGK1+A14*B5+A15*(rab1+rab2);
C31:=(C21+CGK1)*KofSt;
{*****}
(*      ФОРМУЛА НОМЕР 14      *)
{*****}
C22:=153.6*ST(P,0.1);
rab1:=ST(PM1,0.3)+ST(PM2,0.3)+ST(PM3,0.3)+ST(PM4,0.3);
rab2:=ST(PM5,0.3)+ST(PM6,0.3)+ST(PM7,0.3)+ST(PM8,0.3);
B6:=rab1+rab2;
If F=1 then
Begin
  CGK2:=41.52*B6+0.74*B5-0.42*B4;
End else
Begin
  rab1:=ST(PM1,0.35)+ST(PM2,0.35)+ST(PM3,0.35)+ST(PM4,0.35);
  rab2:=ST(PM5,0.35)+ST(PM6,0.35)+ST(PM7,0.35)+ST(PM8,0.35);
  CGK2:=69.92*(rab1+rab2)+1.09*B5-0.7*B6;
End;
C32:=(C22+CGK2)*KofSt;
{*****}
(*      ФОРМУЛА НОМЕР 15 И 16 *)
{*****}
B7:=PM1+PM2+PM3+PM4+PM5+PM6+PM7+PM8;
If F=1 then
Begin
  CH:=152.28*ST(P,0.2);
  rab1:=ST(PM1,0.2)+ST(PM2,0.2)+ST(PM3,0.2)+ST(PM4,0.2);
  rab2:=ST(PM5,0.2)+ST(PM6,0.2)+ST(PM7,0.2)+ST(PM8,0.2);
  CML:=35.53*(rab1+rab2);
  rab1:=ST(PM1,0.2)*L1+ST(PM2,0.2)*L2+ST(PM3,0.2)*L3+ST(PM4,0.2)*L4;
  rab2:=ST(PM5,0.2)*L5+ST(PM6,0.2)*L6+ST(PM7,0.2)*L7+ST(PM8,0.2)*L8;
  CML:=CML+2.48*(rab1+rab2);
  CML:=CML+5*B7+0.03*B2;

```



```

CG:=(CH+CML)*KofSt;
CM:=50.0+27.35*ST(P,0.5)*L;
CM:=CM*KofSt;
End else
Begin
CH:=AG*152.20*ST(P,0.2);
CML:=36.1*B6+1.77*B4+0.63*B7+0.027*B2;
CG:=(CH+CML)*KofSt;
CM:=200.0+7.3*P+27.35*ST(P,0.5)*L;
CM:=CM*KofSt;
End;
IF F=1 then
Begin
KF31:=0.89;    KF32:=0.83;    KFG:=0.76;    KFM:=0.9;
End Else
Begin
KF31:=0.86;    KF32:=0.81;    KFM:=0.88;
  If P>7.0 then
  Begin
    KFG:=0.76;
  End else
  Begin
    KFG:=0.96;
  End;
End;
K31:=CB1*P131T+CB2*R131+CB3*M131;
K32:=CB1*P132T+CB2*R132+CB3*M132;
KG:=CB1*P1G+CB2*R1G+CB3*M1G;
KM:=CB1*P1MT+CB2*R1M+CB3*M1M;
K131:=K31/KF31;
K132:=K32/KF32;
K1G:=KG/KFG;
K1M:=KM/KFM;
Buf1.Flag:=0;    Buf1.PR2:=P132T;    Buf1.MR2:=M132;
Buf1.Ptek:=P;    Buf1.PR3:=P1G;    Buf1.MR3:=M1G;
Buf1.Ltek:=L;    Buf1.PR4:=P1MT;    Buf1.MR4:=M1M;
Buf1.KR1:=K131;  Buf1.RR1:=R131;    Buf1.CR1:=C31*0.001;
Buf1.KR2:=K132;  Buf1.RR2:=R132;    Buf1.CR2:=C32*0.001;
Buf1.KR3:=K1G;   Buf1.RR3:=R1G;     Buf1.CR3:=CG*0.001;
Buf1.KR4:=K1M;   Buf1.RR4:=R1M;     Buf1.CR4:=CM*0.001;
Buf1.PR1:=P131T; Buf1.MR1:=M131;
Buf1.KER1:=Buf1.KR1*Buf1.CR1;
Buf1.KER2:=Buf1.KR2*Buf1.CR2;
Buf1.KER3:=Buf1.KR3*Buf1.CR3;
Buf1.KER4:=Buf1.KR4*Buf1.CR4;
Write(File1,Buf1);
Exit;
End;

```

Пример расчета зоны оптимального применения
различных систем передачи энергии

P	L	КЕэ1	КЕэ2	КЕг	КЕм	10ПТ	20ПТ
1.00	0.00	22.303	20.682	22.838	0.102	КЕм	КЕэ2
1.00	0.20	21.716	20.031	18.449	0.206	КЕм	КЕг
1.00	0.40	21.724	20.039	18.503	0.329	КЕм	КЕг
1.00	0.60	21.731	20.047	18.557	0.468	КЕм	КЕг
1.00	0.80	21.739	20.055	18.612	0.625	КЕм	КЕг
1.00	1.00	21.746	20.064	18.666	0.800	КЕм	КЕг
1.00	1.20	21.753	20.072	18.720	0.991	КЕм	КЕг
1.00	1.40	21.761	20.080	18.775	1.199	КЕм	КЕг
1.00	1.60	21.768	20.088	18.829	1.424	КЕм	КЕг
1.00	1.80	21.776	20.096	18.884	1.665	КЕм	КЕг
1.00	2.00	21.783	20.105	18.938	1.923	КЕм	КЕг
1.00	2.20	21.790	20.113	18.993	2.197	КЕм	КЕг
1.00	2.40	21.798	20.121	19.048	2.486	КЕм	КЕг
1.00	2.60	21.805	20.129	19.102	2.792	КЕм	КЕг
1.00	2.80	21.813	20.137	19.157	3.114	КЕм	КЕг
1.00	3.00	21.820	20.146	19.212	3.451	КЕм	КЕг
1.00	3.20	21.827	20.154	19.266	3.803	КЕм	КЕг
1.00	3.40	21.835	20.162	19.321	4.171	КЕм	КЕг
1.00	3.60	21.842	20.170	19.376	4.553	КЕм	КЕг
1.00	3.80	21.850	20.179	19.431	4.951	КЕм	КЕг
1.00	4.00	21.857	20.187	19.486	5.363	КЕм	КЕг
1.00	4.20	21.864	20.195	19.541	5.790	КЕм	КЕг
1.00	4.40	21.872	20.203	19.595	6.232	КЕм	КЕг
1.00	4.60	21.879	20.211	19.650	6.688	КЕм	КЕг
1.00	4.80	21.887	20.220	19.705	7.158	КЕм	КЕг
1.00	5.00	21.894	20.228	19.760	7.642	КЕм	КЕг
1.00	5.20	21.901	20.236	19.816	8.140	КЕм	КЕг
1.00	5.40	21.909	20.244	19.871	8.652	КЕм	КЕг
1.00	5.60	21.916	20.253	19.926	9.178	КЕм	КЕг
1.00	5.80	21.924	20.261	19.981	9.717	КЕм	КЕг
1.00	6.00	21.931	20.269	20.036	10.269	КЕм	КЕг
1.00	7.00	21.968	20.310	20.313	13.227	КЕм	КЕэ2
1.00	8.00	22.005	20.352	20.590	16.500	КЕм	КЕэ2
1.00	9.00	22.042	20.393	20.868	20.072	КЕм	КЕэ2
1.00	10.00	22.080	20.434	21.147	23.930	КЕэ2	КЕг
1.00	11.00	22.117	20.475	21.427	28.058	КЕэ2	КЕг
1.00	12.00	22.154	20.517	21.707	32.445	КЕэ2	КЕг
1.00	13.00	22.191	20.558	21.989	37.077	КЕэ2	КЕг
1.00	14.00	22.228	20.599	22.271	41.942	КЕэ2	КЕэ1
1.00	15.00	22.266	20.641	22.554	47.030	КЕэ2	КЕэ1
1.00	16.00	22.303	20.682	22.838	52.329	КЕэ2	КЕэ1
1.00	17.00	22.340	20.724	23.122	57.829	КЕэ2	КЕэ1
1.00	18.00	22.378	20.765	23.408	63.522	КЕэ2	КЕэ1
1.00	19.00	22.415	20.807	23.694	69.397	КЕэ2	КЕэ1
1.00	20.00	22.452	20.848	23.981	75.445	КЕэ2	КЕэ1
1.00	21.00	22.490	20.890	24.269	81.660	КЕэ2	КЕэ1
1.00	22.00	22.527	20.931	24.558	88.032	КЕэ2	КЕэ1

Расчет активного сопротивления обмотки ротора с учетом вытеснения тока в стержнях

1. Скольжение ротора

$$s^{(n)} = \frac{\omega - \omega_g^{(n)}}{\omega} \quad (\text{П.3.1})$$

Здесь и далее формулы записаны для первого двигателя.

2. Приведенная высота стержня / 2 /

$$\xi = k_{\xi} h^{(n)} \sqrt{s^{(n)}}, \quad (\text{П.3.2})$$

где $h^{(n)}$ - высота стержня; $k_{\xi} = 70 \frac{\text{I}}{\text{M}}$ для клетки ротора залитой алюминием при расчетной рабочей температуре 75°C и $k_{\xi} = 66,5 \frac{\text{I}}{\text{M}}$ при температуре 115°C . В соответствии с ГОСТ 183-74 для машин, предельно допускаемые температуры обмоток которых соответствуют классам нагревостойкости изоляции E и B, принимается расчетная рабочая температура, равная 75°C , для машин с предельно допус- каемым превышением температуры соответствующим классом нагрево- стойкости F и H - 115°C .

Изоляция класса B применяется в двигателях серии 4A с вы- сотой оси вращения до 132 мм включительно. Изоляция класса F - в двигателях серии 4A с высотой оси вращения свыше 132 мм / 76 /.

3. Находим

$$\varphi\left(\frac{\xi}{\xi^{(n)}}\right) = \frac{\xi^{(n)}}{\xi} \frac{\text{sh } 2\xi^{(n)} + \sin 2\xi^{(n)}}{\text{ch } 2\xi^{(n)} - \cos 2\xi^{(n)}}, \quad (\text{П.3.3})$$

где $\text{sh } 2\xi^{(n)} = \frac{e^{2\xi^{(n)}} - e^{-2\xi^{(n)}}}{2}$, $\text{ch } 2\xi^{(n)} = \frac{e^{2\xi^{(n)}} + e^{-2\xi^{(n)}}}{2}$.

4. Условная глубина проникновения тока

$$h_r^{(n)} = \frac{h^{(n)}}{\varphi\left(\frac{\xi}{\xi^{(n)}}\right)}. \quad (\text{П.3.4})$$

Продолжение

5. Ширина паза соответствующая высоте $h_z / 58 /$

$$b_z^{(n)} = b_i^{(n)} - \frac{b_1^{(n)} - b_2^{(n)}}{h^{(n)} - \frac{b_1^{(n)} + b_2^{(n)}}{2}} \left(h_z^{(n)} - \frac{b_1^{(n)}}{2} \right) \quad (\text{П.3.5})$$

где $b_1^{(n)}, b_2^{(n)}$ - размеры паза.

6. Площадь сечения паза, соответствующая высоте $h_z / 58 /$

$$q_z^{(n)} = \frac{\pi (b_1^{(n)})^2}{8} + \frac{b_1^{(n)} + b_z^{(n)}}{2} \left(h_z^{(n)} - \frac{b_1^{(n)}}{2} \right). \quad (\text{П.3.6})$$

7. Сечение стержня клетки ротора.

$$q_c^{(n)} = \frac{\pi [(b_1^{(n)})^2 + (b_2^{(n)})^2]}{8} + \frac{b_1^{(n)} + b_2^{(n)}}{2} \left(h^{(n)} - \frac{b_1^{(n)} + b_2^{(n)}}{2} \right). \quad (\text{П.3.7})$$

8. Полюсное деление по поверхности ротора

$$\tau_2^{(n)} = \frac{\pi (D_{i1}^{(n)} + 2\delta^{(n)})}{2p_g^{(n)}}. \quad (\text{П.3.8})$$

где $D_{i1}^{(n)}$ - внутренний диаметр статора машины; δ - воздушный зазор.

9. Угол сноса пазов

$$\gamma_c^{(n)} = \frac{b_c^{(n)}}{r_2^{(n)}} \pi, \quad (\text{П.3.9})$$

где $b_c^{(n)}$ - скос пазов.

10. Коэффициенты сноса пазов

$$k_{cx}^{(n)} = \frac{\sin \frac{\gamma_c^{(n)}}{2}}{\frac{\gamma_c^{(n)}}{2}}. \quad (\text{П.3.10})$$

II. Число последовательно соединенных витков в обмотке фазы статора

$$w_1^{(n)} = \frac{S_n^{(n)} z_1^{(n)}}{6 a^{(n)}}, \quad (\text{П.3.11})$$

где $S_n^{(n)}$ - число эффективных проводников в пазу; $z_1^{(n)}$ - число пазов статора; $a^{(n)}$ - число параллельных ветвей обмотки фазы.

12. Сопротивление стержня клетки ротора.

$$r_c^{(n)} = \frac{l_2^{(n)} \cdot 10^{-3}}{\gamma q_c^{(n)}}, \quad (\text{П.3.12})$$

где l_2 - длина сердечника ротора; $l_2 = l_1$ для двигателей с высотой оси вращения до 250 мм включительно, $l_2 = l_1 + 5 \text{ мм}$ свыше 250 мм; l_1 - длина сердечника статора; $\gamma = 23 \frac{\text{М} \cdot \text{ОМ}}{\text{ММ}}$ - удельная проводимость литой клетки из чистого алюминия.

13. Номинальный фазный ток статора

$$I_N^{(n)} = \frac{P_N^{(n)}}{\sqrt{3} U_N \varphi_N^{(n)} \cos \varphi_N^{(n)}}, \quad (\text{П.3.13})$$

где $P_N^{(n)}$ - номинальная мощность; U_N - номинальное линейное напряжение; $\varphi_N^{(n)}$ - номинальный к.п.д.; $\cos \varphi_N^{(n)}$ - номинальный коэффициент мощности двигателя.

14. Полное номинальное сопротивление фазы статора

$$z_N^{(n)} = \frac{U_N}{I_N^{(n)}}. \quad (\text{П.3.14})$$

15. Приведенное активное сопротивление обмотки ротора

$$r_2^{(n)} = R_2^{(n)} z_N^{(n)}, \quad (\text{П.3.15})$$

где $R_2^{(n)}$ - приведенное активное сопротивление обмотки ротора в о.е.

16. Приведенное активное сопротивление обмотки ротора с учетом вытеснения тока в стержнях / 2 /

$$r_{2\frac{1}{2}}^{(n)} = r_2^{(n)} + r_c^{(n)} \left(\frac{q_c^{(n)}}{q_2^{(n)}} - 1 \right) \frac{4 m_1 (w_1^{(n)})^2}{z_2^{(n)}} \left(\frac{k_{0\sigma}^{(n)}}{k_{ск}^{(n)}} \right)^2, \quad (\text{П.3.16})$$

где m_1 - число фаз статора; $z_2^{(n)}$ - число пазов ротора; $k_{0\sigma}^{(n)}$ - обмоточный коэффициент статора.

Кешуов Сейтказы Асылсеитович
АВТОНОМНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МОБИЛЬНЫХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Министерство печати и массовой информации
Республики Казахстан
480013 г. Алматы, пл. Республики, 13

Подписано в печать 30.07.93. Формат 60x84/16. Бум.тип.№ 2.
Печать офсетная. Усл.печ.л.9,93. Усл.-кр.отт.10,27.
Уч.-изд.л.6,8. Заказ 131. Тираж 300.
Типография КазгосИНТИ, 480096, г.Алматы, Богенбай батыра, 221.