

А. Д. Степанов

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ
ТЕПЛОВОЗОВ
И ГАЗОТУРБОВЗОВ

М А Ш Г И З

А. Д. СТЕПАНОВ

● НЗ. ЧИТ./зала
НЕ ВЫДАЕТСЯ

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОВОЗОВ И ГАЗОТУРБОВОЗОВ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва 1957

4624 $\frac{18}{59}$
11
16478

В книге рассмотрены вопросы повышения эффективности передачи мощности от первичного двигателя к движущим осям тепловозов и газотурбовозов: улучшение использования мощности теплового двигателя и повышение экономичности режимов его работы, расширение диапазона изменения силы тяги и скорости локомотива при работе на полной мощности и улучшение пусковых характеристик. Показано значение передачи в улучшении характеристик локомотивов и области преимущественного применения различных передач.

Наибольшее внимание уделяется вопросам усовершенствования электрической передачи: выбору характеристик генератора, анализу совместной работы теплового двигателя и генератора, анализу работы систем автоматического регулирования двигатель-генератора.

Книга предназначена для инженеров и техников, работающих по проектированию и эксплуатации тепловозов и газотурбовозов, а также для научных работников и студентов вузов.

Рецензент д-р техн. наук проф. А. С. Димитрадзе

Редактор канд. техн. наук Б. Г. КАМЕНЕЦКИЙ

Редакция литературы по транспортному,
дорожному и энергетическому машиностроению
Зав. редакцией ин. ж. Н. Н. ВОСКРЕСЕНСКИЙ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Работникам промышленности, железнодорожного транспорта и научных организаций необходимо приложить большие усилия, чтобы в короткий срок создать совершенные конструкции советских тепловозов и газотурбовозов. Передача мощности от теплового двигателя к движущим осям является одной из важнейших проблем в создании локомотивов этого вида. Цель настоящей книги — проанализировать и обобщить результаты проделанной в Советском Союзе и за границей работы в этом направлении и наметить дальнейшие пути усовершенствования передач.

В Советском Союзе, как и в большинстве стран, для тепловозов и запроектированных турбовозов средней и большой мощности применяется электрическая передача, и лишь в последние годы промышленность приступила к созданию локомотивов с гидромеханической передачей. В работе даны краткие характеристики механической, гидравлической и гидромеханической передач, и основное внимание уделено электрической передаче, изучением которой автор занимается в течение многих лет.

В работе по усовершенствованию передачи можно выделить две основные задачи: 1) улучшение с помощью передачи использования теплового двигателя, повышение экономичности и надежности его работы, улучшение тяговых свойств локомотива и т. д. и 2) улучшение технико-экономических показателей самой передачи (уменьшение ее веса, повышение к. п. д. и надежности работы, снижение стоимости и т. д.).

Обе эти задачи важны и в значительной мере взаимосвязаны. Наиболее подробно рассмотрен основной вопрос о взаимодействии теплового двигателя и передачи: проанализированы характеристики транспортных тепловых двигателей и существующих передач, условия их взаимного соответствия, а также связь и соемственная работа систем автоматического регулирования теплового двигателя и генератора.

В книге использован опыт проектных работ, проводившихся при участии автора на заводе «Динамо» имени С. М. Кирова и в Московском энергетическом институте (МЭИ), теоретические и экспериментальные исследования, проведенные под руководством автора на кафедре «Электрический транспорт» МЭИ при постоянном и тесном содружестве с Харьковским заводом тепловозного электрооборудования (ХЭТЗ), исследования, производившиеся Тепловозным отделением Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ЦНИИ МПС), а также работы других организаций и предприятий.

ГЛАВА I

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОВОЗНОЙ ТЯГИ

1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛОВОЗНОЙ ТЯГИ В СССР И ЗА РУБЕЖОМ

Тепловозная тяга наряду с электрической принадлежит к наиболее прогрессивным видам тяги железнодорожных поездов, призванным заменить малоэкономичную паровую тягу. За последние годы в большинстве стран наблюдается быстрое развитие тепловозной тяги. В нашей стране были проведены наиболее тщательные испытания тепловозов с электрической и механической передачей, начато впервые серийное производство поездных тепловозов. Участок Ашхабадской железной дороги был первым в мире участком, переведенным на тепловозную тягу.

В этот период за границей строились только автомотриссы и тепловозы небольшой мощности для маневровой работы и промышленного транспорта.

Однако темп развития тепловозной тяги в СССР, так же как и электрической тяги, был до последнего времени невысок. В 1954 г. тепловозами и электровозами было выполнено лишь 12% всех перевозок железнодорожного транспорта страны.

Между тем, расчеты и опыт эксплуатации [7] и [9] показывают, что для большинства линий железных дорог при существующих грузопотоках тепловозная тяга является наиболее экономичной и обеспечивает высокие технические показатели в эксплуатации.

К 1960 г. намечено электрифицировать 8100 км и перевести на тепловозную тягу 18 000 км железных дорог, что позволит выполнить этими видами тяги 40—50% ж.-д. перевозок. Таким образом, преимущественное развитие получает тепловозная тяга. Для обеспечения этого решения ряд паровозостроительных заводов (Ворошиловградский, Коломенский, Брянский, Муромский) перешли на производство тепловозов. Строится новый завод тепловозного электрооборудования.

В дальнейшем по мере ввода в эксплуатацию мощных гидроэлектростанций темп электрификации железных дорог будет расти и в 1965 г. тепловозная и электровозная тяга должны выполнить 80—85% перевозок. Протяженность путей, переведенных на тепловозную тягу, будет больше протяженности электрифицированных путей, но так как электрифицируются наиболее грузо-

напряженные линии, оба вида тяги выполняют приблизительно одинаковый объем перевозок.

Большое значение имеет применение тепловозов в маневровой работе на крупных станциях. Зарубежная практика показывает, что тепловозы являются наиболее экономичным и целесообразным типом маневрового локомотива не только для линий с паровой и тепловозной тягой, но и для электрифицированных линий. Тепловозы могут оказаться целесообразными также для обслуживания промышленного транспорта ряда отраслей промышленности.

Для уменьшения расхода жидкого топлива в Советском Союзе ведется работа по применению твердого топлива в тепловозах (газогенераторные тепловозы) и в газотурбовозах. В перспективе следует ожидать широкого применения турбовозов с использованием атомной энергии.

За рубежом тепловозная тяга развивалась крайне неравномерно. Наибольшее развитие она имеет в США. Однако вначале она использовалась там главным образом для маневровой работы и промышленного транспорта и в виде отдельных быстроходных дизель-поездов. Только с 1940 г. началось серийное производство грузовых тепловозов и с 1941 г. железные дороги стали переводиться на тепловозную тягу. За последние 10—12 лет применение тепловозов для грузового и пассажирского движения в США резко возросло. Если в 1945 г. тепловозы выполнили только 7% всех грузовых перевозок, а паровозы 91%, и еще в 1948 г. парк тепловозов и электровозов равнялся 6,4% всего парка локомотивов, то в 1956 г. тепловозами было выполнено 88% и паровозами 9% грузовых перевозок. Еще большая часть работы выполнена тепловозами в пассажирском сообщении (91%) и в маневровой работе на станциях (99%). Парк локомотивов на 1 декабря 1956 г. состоял из 26 170 тепловозов, 3500 паровозов и 630 электровозов. Постройка паровозов прекращена; за 10 лет сняты с эксплуатации 34 000 паровозов.

В Канаде железные дороги также переводятся в основном на тепловозную тягу, хотя и не такими темпами, как в США. В 1952 г. тепловозы составляли 18% и электровозы 1,1% парка локомотивов. Приобретение паровозов прекращено и заказываются только тепловозы. В 1955 г. тепловозы выполнили около 50% грузовых перевозок, 30—35% пассажирских перевозок и 60—65% маневровой работы.

В Западной Европе тепловозная тяга находится в начальной стадии развития.

В некоторых странах, бедных запасами топлива и богатых гидроэнергетическими ресурсами (Швейцария, Нидерланды, Швеция и Италия), электрифицированные железные дороги выполняют более 70% всех железнодорожных перевозок. Однако в большинстве стран (Англия, Германия, Франция, Испания, Бельгия и др.) перевозки в основном осуществляются паровозами. Тепловозы применяются главным образом для маневровой работы. Всего в Западной Европе в 1952 г. имелось 74 703 паровоза (91,4%), 1280 тепловозов (1,6%) и 5654 электровоза (7%). В настоящее время во многих странах намечены большие программы внедрения тепловозной и электрической тяги.

В Англии с 1957 г. производство паровозов прекращается. Разработан план реконструкции железных дорог, рассчитанный на 15 лет. По этому плану намечено затратить 150 млн. фунтов стерлингов на постройку тепловозов (2500 магистральных и 1250 маневровых) и 60 млн. фунтов стерлингов на постройку электровозов, что говорит о преимущественном развитии тепловозной тяги.

Во Франции намечено перевести на электрическую тягу 2000 км железных дорог, что вместе с существующими электрифицированными линиями составит около 17% всей протяженности, и около 17 000 км менее загруженных линий (более 40%) — на тепловозную тягу.

В Западной Германии намечен перевод на электрическую тягу 4300 км железных дорог, что потребует приблизительно 1000—1200 электровозов, и изготовление 1900 магистральных и 1000 маневровых тепловозов. Азия (без СССР) имеет 20 321 паровоз (96,6%), 263 тепловоза (1,2%) и 471 электровоз (2,2%), но в ряде стран намечен перевод на тепловозную тягу и паровозы больше не заказываются (Ирак, Пакистан и др.).

Из приведенных данных следует, что по введению прогрессивных видов тяги все страны отстают от США, но за последние годы в большинстве стран мира стремятся к замене паровой тяги электровозами и тепловозами.

Следует отметить, что в Западной Европе условия для развития электрической тяги более благоприятны, чем в США, так как нефтяные ресурсы Западной Европы весьма ограничены, стоимость жидкого топлива высока, стоимость же электрической энергии относительно ниже (за счет большего количества гидроэлектростанций). Поэтому стоимость энергии для движения при электрической тяге в некоторых странах ниже, чем при тепловозной. Несмотря на значительно меньшие гидроэнергетические ресурсы, мощность гидроэлектростанций в Европе больше, чем в США, выработка энергии на гидростанциях составляет более половины всей выработки.

Газотурбинная тяга находится еще в начальной стадии развития. В настоящее время в США эксплуатируется 26 газотурбовозов и заказаны еще 45. Построены также опытные газотурбовозы в Англии, Франции и Швеции.

Построенные газотурбовозы с одновальным газотурбинным двигателем обладают более низким к. п. д., чем тепловозы. Расход условного топлива на единицу работы в 2 и более раза выше, чем в тепловозе. Однако преимущества газотурбовоза в сравнении с тепловозом заключаются в увеличении мощности на единицу веса, использовании более дешевого топлива, большей долговечности двигателя; газотурбинный двигатель проще по конструкции и обслуживанию. Опыт параллельной эксплуатации газотурбовозов и тепловозов на дороге Юнион Пасифик (США) показал целесообразность и практичность газотурбовозов.

Преимущество газотурбовозов состоит в возможности значительного увеличения их к. п. д. путем повышения рабочей температуры газов, которая в настоящее время ограничивается лишь термостойкостью

и условиями охлаждения лопаток газовой турбины, а также путем использования тепла отходящих газов, применения двухвальных газотурбинных установок и т. д. Разрабатывается метод использования пылеугольного топлива для газотурбинных установок. Опытные установки такого типа построены в США и Англии. Поэтому имеются основания ожидать, что газотурбовозы получат широкое применение наряду с электрической и тепловозной тягой.

2. ПАРАМЕТРЫ СОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОВОЗОВ И ГАЗОТУРБОВОЗОВ

Условия эксплуатации и характер перевозок железнодорожного транспорта существенно влияют не только на преимущественное развитие того или иного вида тяги, но и на параметры локомотивов. Поэтому при изучении и использовании опыта постройки локомотивов в других странах необходимо учитывать особенности эксплуатации их железнодорожного транспорта.

Железные дороги США характеризуются большой протяженностью, мощным верхним строением пути и применением тяжелых типов рельсов, допускающих давление оси на рельс до 30—33 *т*. Грузовые перевозки значительно преобладают над пассажирскими, число грузовых локомотивов почти в 5 раз превышает число пассажирских. Вес грузовых поездов достигает 4000—6000 *т*. Поэтому требуются в основном локомотивы с большим сцепным весом.

В большинстве стран Западной Европы дальность перевозок невелика; нагрузка локомотива на ось ограничивается величиной 16—20 *т*. Вес грузовых поездов составляет 600—1200 *т*, пассажирских — 300—600 *т*. Пассажирские перевозки преобладают над грузовыми. Так, в 1954 г. в Англии, Франции, Германии, Италии грузовые перевозки составляли от 26 до 46% всего объема железнодорожных перевозок [8]. Следовательно, для Западной Европы в основном нужны легкие быстроходные локомотивы, что легче обеспечивается при электрической тяге. Этим объясняется также большее, чем в США, применение моторных вагонов и дизель-поездов.

В железнодорожном транспорте Советского Союза, как и в США, преобладают грузовые перевозки. По дальности перевозок и по соотношению стоимостей энергии для движения советские дороги более близки к дорогам США, чем Западной Европы. Средняя грузонапряженность железных дорог Советского Союза в несколько раз превышает грузонапряженность их в других странах, не исключая США. Поэтому для Советского Союза особенно важно увеличение веса поездов и скорости движения, а следовательно и создание мощных локомотивов с большим сцепным весом. Однако при существующих рельсах давление оси на рельс ограничивается величиной 21—23 *т*. В этих условиях возникает необходимость замены паровозов тепловозами и электровозами. В настоящее время промышленностью выпускаются серийно тепловозы ТЭЗ мощностью 4000 л. с. в двух секциях и узкоколейные тепловозы ТУ2 мощностью 300 л. с. Проектирование, изготовление и испытание опытного образца тепловоза

ТЭЗ заняло в общей сложности более 7 лет. В период проектирования тепловоз ТЭЗ по своим технико-экономическим показателям был выше лучших зарубежных тепловозов. Однако за последние годы за границей появились тепловозы, превосходящие его по своим показателям. В табл. 1 приведены основные данные поездных тепловозов, появившихся за последние 2—3 года.

Данные табл. 1 показывают различия между европейскими и североамериканскими тепловозами, вытекающие из условий эксплуатации. Основной тенденцией развития тепловозов в США является увеличение силы тяги при больших нагрузках на рельс. В Европе, наоборот, основное внимание направлено в сторону снижения веса, главным образом за счет применения легких быстроходных дизелей и в некоторых случаях гидропередачи. Тепловозы США выполняются с различными передаточными числами между тяговыми двигателями и колесами. В табл. 1 приведены данные для максимального передаточного числа, при котором тяговые параметры наиболее близки к параметрам ТЭЗ.

По большинству показателей тепловоз ТЭЗ занимает промежуточное место. Наиболее важным показателем является вес тепловоза на единицу мощности. Тепловоз ТЭЗ в этом отношении стоит выше тепловозов США, но уступает европейским. Вес на единицу мощности зависит от величины длительной силы тяги: увеличение длительной силы тяги при прочих равных условиях (одинаковая мощность и максимальная скорость и т. д.) ведет к увеличению веса передачи и механической части тепловоза. Тепловозы DL-600, DL-701 и «Трэн Мастер» созданы как универсальные тепловозы для грузовой, передаточной и маневровой работы с тяжелыми поездами. Тепловоз DL-600 имеет длительную силу тяги на 67% больше, чем тепловоз ТЭЗ при увеличении мощности на 12% и увеличении веса на 22%. При этом тепловоз DL-600 обладает большим коэффициентом тяги. Следует заметить, что увеличение длительной силы тяги целесообразно лишь при увеличении мощности. Длительная сила тяги тепловоза DL-600 практически может быть использована лишь при передаточной работе, так как для поездной работы скорость 14 км/час чрезмерно низка. Тепловоз «Делтик» предназначен для быстроходного пассажирского сообщения и имеет силу тяги в 1,5 раза меньше, чем тепловоз ТЭЗ. Так как изменением передаточного отношения между тяговыми электродвигателями и колесами можно изменить силу тяги (без изменения веса тепловоза), то для оценки показателей тепловозов «Делтик» и ТЭЗ следует привести максимальную скорость первого к максимальной скорости ТЭЗ, т. е. к 100 км/час. При этом длительная сила тяги увеличится до 20 000 кг и коэффициент длительной силы тяги до 0,188, что близко к тяговым показателям тепловоза ТЭЗ, но при значительно меньшем весе на единицу мощности. Бельгийский тепловоз «Кокерилл» превосходит тепловоз ТЭЗ по коэффициенту тяги и весу на единицу мощности. По установленной мощности тепловоз ТЭЗ существенно уступает тепловозу «Делтик» и несколько уступает DL-600 и «Трэн Мастер».

Основные данные современных поездных тепловозов

Основные показатели	Страны и изготовители								
	СССР	СССР	США, АЛКО-ДЖИИ	США, АЛКО-ДЖИИ	США, Фэрбенкс- Морзе	Англия, Инглиш Электрик	Бельгия, Кокерилл	Франция, Ателье де Форж	Германия, МАК
Тип	ТЭЗ	—	DL-600	DL-701	„Трэн Мастер“	„Дел- тик“	201	060DA	V-200
Год выпуска	1953	Проект	1954	1956	1953	1955	1955	1954	1955
Мощность секции в л. с.	2000	3000	2250	1800	2400	3300	1750	2000	2000
Формула осей	C_0-C_0	C_0-C_0	C_0-C_0	B_0-B_0	C_0-C_0	C_0-C_0	B_0-B_0	C_0-C_0	$B-B$
Вес в рабочем состоя- нии в т	126	134	167	109	170	108	84	121	80
Давление оси на рельс (макс.) в т	21	22,3	29,5	27,25	28,4	18	21	20,2	20
Длина по буферам в м	16,974	—	20,2	17,38	—	20,1	16,15	18,86	—
Длительная сила тя- ги в кг	21 000	25 000	36 000	24 000	—	14 000	17 000	22 000	—
Длительная скорость в км/час	20,5	25	14	~17	—	53	20	19	—
Максимальная ско- рость в км/час	100	100	104	104	104	145	120	75	140
Вес на единицу мощ- ности в кг/л. с.	63	44,6	74	60,5	71	31	48	60,5	40
Коэффициент тяги при длительном ре- жиме	0,175	0,186	0,215	0,22	—	0,13	0,202	0,182	—
Максимальная ско- рость полного ис- пользования мощ- ности в км/час	70	90	104	104	—	145	120	75	—
Передача									Гидро- механи- ческая

Повышение мощности тепловозов целесообразно при сохранении или уменьшении их размеров и веса. Увеличение числа осей нецелесообразно, так как ухудшает условия вписывания тепловоза в кривые, а нагрузки оси на рельс ограничены. В США были выпущены 12-осные односекционные тепловозы мощностью 3000 л. с., весом 261 т. Однако они не получили распространения, и производство их прекращено. В настоящее время все поездные тепловозы имеют 4 или 6 осей и для вождения тяжелых поездов секции соединяются по системе многих единиц по 2—3 и больше. Подавляющее большинство эксплуатируемых и заказываемых грузовых тепловозов в США имеет мощность 1500—1750 л. с. и выполняется с 4 осями. Таким образом, по своим показателям тепловоз ТЭЗ близок к современным заграничным грузовым тепловозам, уступая некоторым из них по мощности, коэффициенту тяги и весу на единицу мощности.

В табл. 1 приведены также предварительные данные тепловоза с дизелем мощностью 3000 л. с., проект которого разрабатывается Коломенским тепловозостроительным заводом имени В. В. Куйбышева совместно с ХЭТЗ. По основным показателям он превосходит остальные тепловозы, уступая тепловозу «Делтик» по весу, но при значительно большей силе тяги.

Степень использования полной мощности дизеля при движении поезда зависит как от условий эксплуатации: ограничения скорости по состоянию пути, профиля пути (снижение мощности при движении по уклону), веса поезда и т. д., так и от характеристики передачи мощности от дизеля к колесам. Помимо потерь мощности в самой передаче, использование мощности часто ограничивается характеристикой передачи.

В тепловозе ТЭ2 свободная мощность дизелей (т. е. номинальная мощность за вычетом мощности, расходуемой на вспомогательные устройства) равна в среднем 1850 л. с. Максимальная мощность, реализуемая на ободу колес, составляет 1500 л. с. при скоростях 20—55 км/час и уменьшается до 1250—1400 л. с. при скоростях 10—20 км/час и до 950 л. с. при 90 км/час из-за потерь в передаче и ограничения по напряжению генератора. К этому следует добавить снижение используемой мощности дизеля вследствие изменения нагрузки вспомогательных устройств, изменения температуры обмоток генератора и возбuditеля и т. д., что в среднем понижает мощность еще на 8—10%. В результате практически реализуемая мощность составляет 45—75% той мощности, которую дизель мог бы отдавать для тяги. Этот пример показывает, как важна проблема использования мощности дизеля. Путем улучшения характеристик передачи возможно существенно повысить использование мощности при незначительном увеличении веса тепловоза за счет изменения параметров генератора и добавления некоторых элементов электрооборудования малой мощности. Это эквивалентно повышению мощности тепловоза без увеличения его размеров и уменьшает вес на единицу реализуемой мощности.

От типа и характеристики передачи зависит также использование сцепного веса и мощности локомотива при пуске. Существенное

Основные данные современных газотурбовозов

Основные показатели	Страны и изготовители						
	СССР, Коломен- ский завод и ХЭТЗ	Англия, Метро- политен- Виккерс	США, ДЖИИ	США, Вестин- гауз	США, ДЖИИ	Фран- ция, Рено	Швеция, Гета- веркен
Год выпуска	Про- ект	1952	1954	1954	Про- ект	1952	1954
Мощность в л. с. ..	3500	3000	4500	4000	8500	1000*	1000*
Осевая формула ..	$C_0 - C_0$	$C_0 + C_0$	$B_0 - B_0 -$ $- B_0 - B_0$	$B_0 - B_0 -$ $- B_0 - B_0$	$C_0 - C_0$ $+ C_0 - C_0$	B - B	O - C - - O
Вес конструктив- ный в т	138	131,6	235	232	368	54	60
Длина по буферам в м	—	20,4	25,4	23,65	36,37	16,18	—
Давление оси на рельс в рабочем состоянии в т ..	23,0	22,0	29,5	29,0	30,7	13,5	16
Длительная сила тяги в кг	25 000	13 600	47 500	23 900	65 600	—	—
Длительная ско- рость в км/час ..	28	48,3	21	37	29	—	—
Максимальная ско- рость в км/час ..	100	145	110	160	104	120	90
Вес на единицу мощности в кг/л. с.	39,5	44	52	58	43,4	54	60
Коэффициент тяги при длительном режиме	0,181	0,113	0,202	0,103	0,183	—	—
К. п. д. номиналь- ный	0,22	0,18	0,16	0,169	—	0,335	0,31
Топливо	Ма- зут	Ди- зель- ное	Ма- зут	Ма- зут	Ма- зут	Ди- зель- ное	Ди- зель- ное

* С механическим генератором газов и механической передачей.

влияние имеют характеристики передачи на экономичность и долговечность теплового двигателя.

Передачи современных зарубежных тепловозов обеспечивают, как правило, полное использование свободной мощности дизеля (за вычетом потерь в передаче) при всех рабочих скоростях движения независимо от температуры, вспомогательной нагрузки и т. д. В тепловозе ТЭЗ применена схема автоматического регулирования, обеспечивающая полное использование мощности дизеля, но, в связи с ограничениями по генератору и электродвигателям, — лишь до скорости 70 км/час. Увеличение наибольшей скорости при полном использовании мощности является одной из важных задач тепловозостроения.

В табл. 2 приведены проектные данные газотурбовоза, разрабатываемого Коломенским тепловозостроительным заводом имени В. В. Куйбышева и ХЭТЗ совместно с МВТУ и МЭИ, и данные современных зарубежных газотурбовозов.

Сравнение этих данных показывает, что по проектным материалам советский газотурбовоз имеет в целом лучшие показатели, чем зарубежные. Проектный газотурбовоз ДЖИИ имеет большую мощность в одной секции. Однако это достигнуто за счет увеличения нагрузки оси на рельс до 30,7 т, что для железнодорожных путей Советского Союза неприемлемо. Опытные тепловозы с механическим генератором газа имеют более высокий к. п. д., но удельный вес их высок, несмотря на использование наиболее легкой механической передачи. Мощность их также мала. В Советском Союзе ведутся работы по созданию газотурбовоза с механическим генератором газа. Начата разработка газотурбовоза еще большей мощности и быстроходного пассажирского тепловоза с максимальной скоростью 160 км/час. Созданы также первые отечественные конструкции маневровых тепловозов 400 л. с. с гидравлической передачей и мощностью 750 л. с. с гидравлической и с электрической передачами.

Приведенные данные свидетельствуют о широком развертывании проектных работ по созданию новых локомотивов с тепловыми двигателями.

Одной из важнейших проблем в тепловозостроении всегда была и остается проблема создания совершенной передачи мощности, обеспечивающей высокое использование мощности теплового двигателя и тяговых параметров локомотива.

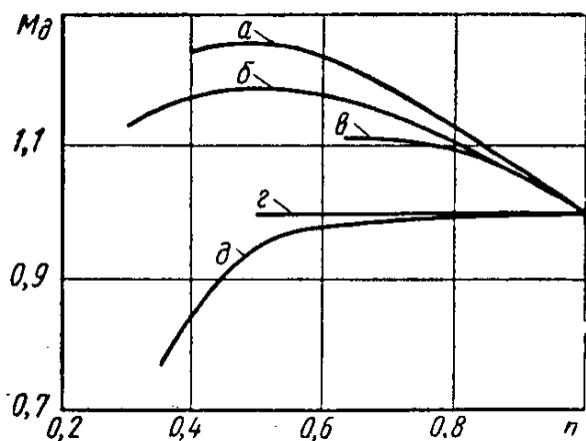
ГЛАВА II

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Для определения основных параметров передачи необходимо знать характеристики первичного двигателя: зависимости мощности, крутящего момента и удельного расхода топлива от угловой скорости. Дизель является двигателем с постоянным моментом. При постоянной подаче топлива на один цикл расчетная диаграмма теоретического цикла (площадь которой пропорциональна работе одного цикла) сохраняется неизменной при изменении угловой скорости. Однако индикаторная диаграмма действительного рабочего процесса и момент на выходном валу дизеля несколько изменяются в зависимости от угловой скорости. Причинами этого являются изменение фактической подачи топлива в зависимости от угловой скорости, влияние фаз распределения на процесс воспламенения и сгорания

топлива, изменение механических потерь и т. д. В зависимости от быстроходности, мощности и других параметров двигателя, характеристики топливного насоса, степени и способа наддува, способа впрыскивания топлива и смесеобразования, регулировки фаз распределения и т. д. форма характеристики дизеля в некоторых пределах изменяется. На фиг. 1 приведены внешние характеристики некоторых тепловозных дизелей при постоянном положении регулирующего органа, соответствующего номинальному моменту дизеля при номинальной угловой скорости (часто называемые «внешними»

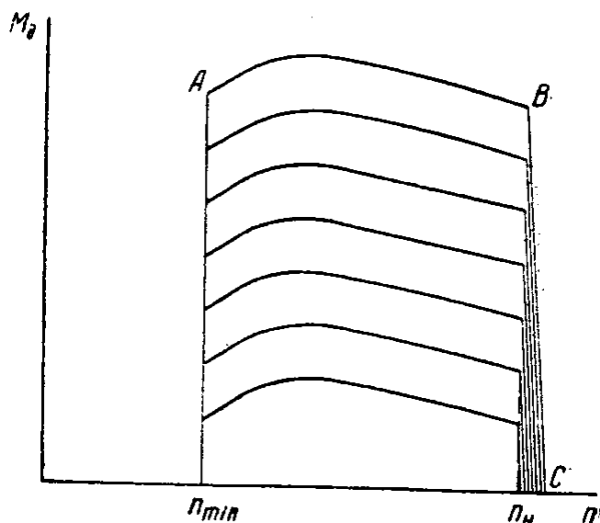


Фиг. 1. Внешние характеристики тепловозных дизелей.

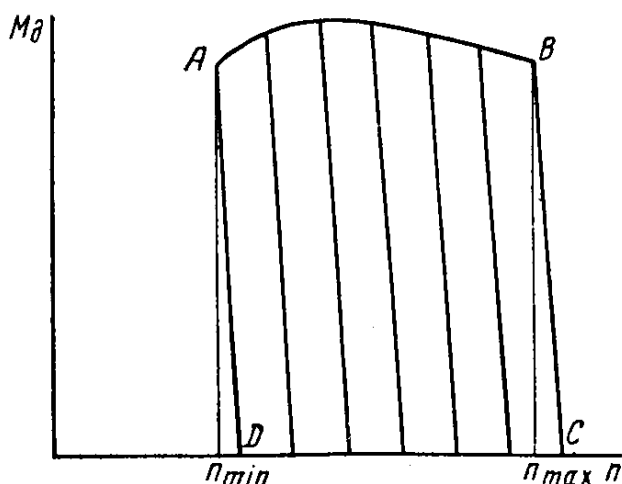
а — ЯАЗ — 204, 112 л. с.; б — 135 л. с.;
в — Д50, 1000 л. с.; г — Болдуин, 1750 л. с.;
д — «Делтика», 1650 л. с.

характеристиками). Эти номинальные значения приняты на фиг. 1 за единицу. Для большинства дизелей при снижении угловой скорости характерно небольшое увеличение момента до некоторого максимума, после чего момент падает. У некоторых дизелей момент при

номинальном режиме является максимальным. Для каждого дизеля имеется некоторая наименьшая угловая скорость, ниже которой он работать не может. Значение минимальной скорости зависит главным образом от способов впрыскивания топлива и смесеобразования. Управление дизелем, т. е. изменение развиваемой им мощности по желанию машиниста, может осуществляться либо изменением положения рейки топливного насоса, либо изменением настройки регулятора. В первом случае каждому положению органа управления соответствует положение регулирующего органа — рейки топливного насоса — и, следовательно, определенная подача топлива. Дизель в этом случае снабжается двухрежимным регулятором угловой скорости, ограничивающим максимальную угловую скорость и обеспечивающим устойчивую работу при минимальной скорости холостого хода. В пределах скоростей от минимальной до максимальной регулятор не действует. Такому способу управления соответствует серия характеристик (фиг. 2), называемых «частичными», ограниченных внешней характеристикой AB и регуляторной характеристикой BC . Последняя имеет наклон, обусловленный статизмом регулятора (если он является статическим). При астатическом или изодромном регуляторе линия BC вертикальна. Как правило, двухрежимные регуляторы выполняются статическими. Режим холостого хода соответствует точкам $M_0 = 0$. Для каждой частичной характеристики существует минимальная угловая скорость, ниже которой дизель не может работать.



Фиг. 2. Зависимость крутящего момента дизеля от угловой скорости при различных предельных подачах топлива и двухрежимном регуляторе.



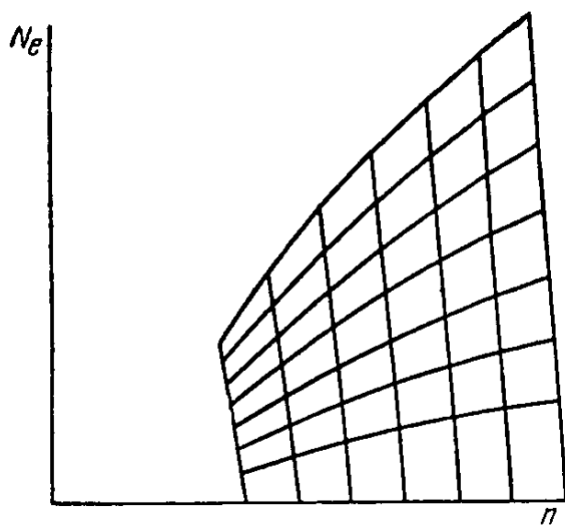
Фиг. 3. Зависимость крутящего момента дизеля от угловой скорости при различных настройках многорежимного регулятора.

натяжение его пружины. Каждому положению соответствует определенное натяжение пружины и определенная регуляторная характеристика. Семейство регуляторных характеристик (фиг. 3) ограни-

В последнее время транспортные дизели снабжаются чаще многорежимными регуляторами угловой скорости. В этом случае орган управления воздействует на настройку регулятора, изменяя

чивается так же, как и в предыдущем случае внешней характеристикой AB , соответствующей максимальной подаче топлива (положению упора исполнительного органа регулятора), и характеристикой BC максимальной угловой скорости. В транспортных дизелях точка B , соответствующая положению упора исполнительного органа регулятора при настройке его на максимальную угловую скорость, как правило, соответствует номинальному режиму дизеля. Наклон регуляторных характеристик зависит от статизма регулятора. Мощные дизели выполняются чаще всего с изодромными регуляторами, при которых регуляторные характеристики вертикальны. На фиг. 4 нанесены семейства кривых эффективной мощности $N_e = f(n)$, соответствующих обоим способам управления.

Все регуляторы угловой скорости обладают некоторой нечувствительностью. Поэтому каждая регуляторная характеристика представляет собой не линию, а полосу, в пределах которой возможна любая угловая скорость. Нечувствительность статических регуляторов составляет обычно 1—2% от номинальной угловой скорости, изодромных — 0,5—1%.



Фиг. 4. Зависимость мощности дизеля от угловой скорости для характеристик фиг. 2 и 3.

Число кривых в каждом семействе характеристик зависит от числа положений органа управления. При плавном управлении в принципе возможна работа дизеля в каждой точке области, ограниченной кривой $ABCD$ (фиг. 3). Однако практически не все режимы в этой области допускаются как рабочие режимы. Кроме того, экономичность работы дизеля различна при разных режимах работы.

Для некоторых дизелей, чаще всего быстроходных, с нагнетателями (четырёхтактных с наддувом или двухтактных) не допускается продолжительная работа по внешней характеристике при пониженной угловой скорости, вследствие уменьшения давления нагнетаемого воздуха, увеличения опережения впрыска топлива во времени, уменьшения интенсивности охлаждения или других причин. Для таких дизелей не рекомендуется применение регуляторов, при которых работа по внешней характеристике является нормальной.

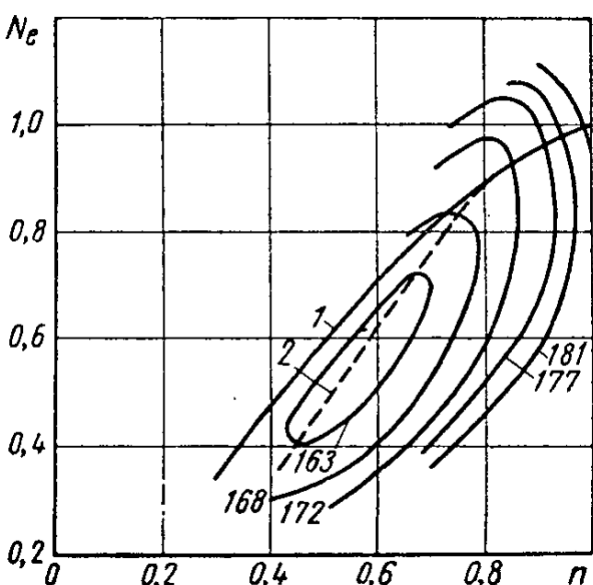
Другие дизели могут работать по внешней характеристике в ограниченной зоне угловых скоростей и не допускают продолжительной нагрузки при малых угловых скоростях. Так, для дизеля 1Д12 узкоколейного тепловоза возможна работа под нагрузкой при $n \geq 750$ об/мин (хотя при холостом ходе дизель имеет $n = 500$ об/мин.).

В некоторых случаях минимальная допускаемая угловая скорость вала дизеля ограничивается опасными крутильными колебаниями. По этой причине, например, работа дизеля 2Д100 с генератором

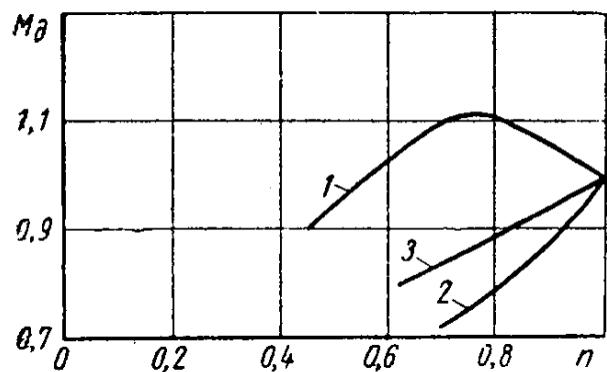
возможна при угловых скоростях не ниже 400 об/мин, хотя минимальная рабочая скорость вала дизеля 300 об/мин.

Экономичность работы дизеля при неполной мощности зависит от соотношения между крутящим моментом и угловой скоростью. Как видно из фиг. 4, одна и та же мощность, меньшая номинальной, может быть реализована при различных значениях угловой скорости и крутящего момента. В большинстве случаев увеличение угловой скорости ускоряет износ движущихся частей дизеля и уменьшает его к. п. д. Однако у некоторых дизелей при уменьшении угловой скорости увеличиваются неуравновешенные динамические усилия в кривошипно-шатунном механизме, ускоряющие износ подшипников и коленчатого вала.

Механический к. п. д. дизеля монотонно уменьшается с увеличением угловой скорости и увеличивается с увеличением момента. Другие потери находятся в более сложной зависимости от угловой скорости и момента. На фиг. 5 представлено семейство кривых зависимости $N_e = f(n)$ в относительных единицах при различных значениях удельного расхода топлива в г/л. с. ч., указанного около каждой кривой для дизеля 135 л. с., 2000 об/мин, применяемого в немецких автотрассах [29]. Кривая 1 является внешней характеристикой дизеля. Из кривых следует, что для каждого значения удельного расхода (или для каждого значения к. п. д., поскольку он является величиной обратно пропорциональной удельному расходу) имеется точка максимума мощности, причем с увеличением удельного расхода топлива увеличивается эта максимальная мощность. Точка максимума соответствует наиболее экономичному режиму работы дизеля при данном значении мощности, так как увеличение и уменьшение угловой скорости при той же мощности приводит к увеличению расхода топлива. Следовательно, линия 2 наибольшей экономичности является геометрическим местом максимумов кривых постоянного удельного расхода топлива. На фиг. 6 кривая 1 по-



Фиг. 5. Зависимость мощности от угловой скорости при различных значениях удельного расхода топлива в г/л. с. ч. для дизеля 135 л. с., 2000 об/мин :
1 — внешняя характеристика ; 2 — кривая наибольшей экономичности.

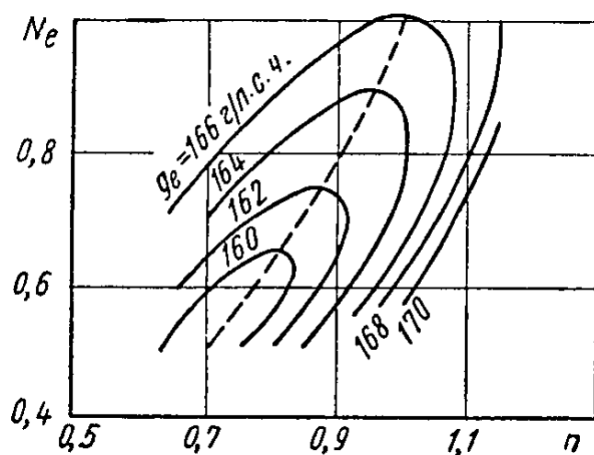


Фиг. 6. Кривые наибольшей экономичности различных дизелей :
1 — дизель 135 л. с., 2000 об/мин ; 2 — дизель 1000 л. с., 1500 об/мин ; 3 — дизель 1000 л. с., 740 об/мин.

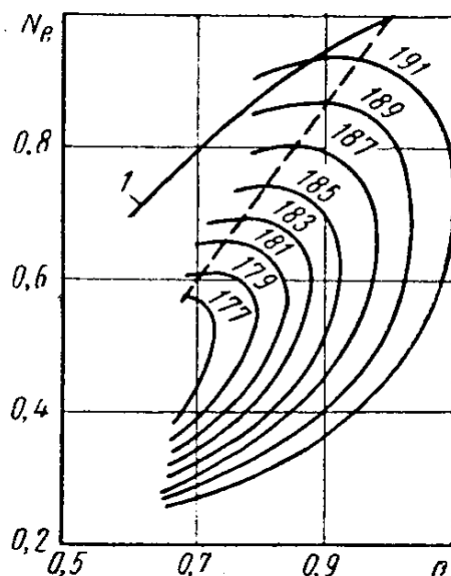
казывает, что для каждого значения удельного расхода (или для каждого значения к. п. д., поскольку он является величиной обратно пропорциональной удельному расходу) имеется точка максимума мощности, причем с увеличением удельного расхода топлива увеличивается эта максимальная мощность. Точка максимума соответствует наиболее экономичному режиму работы дизеля при данном значении мощности, так как увеличение и уменьшение угловой скорости при той же мощности приводит к увеличению расхода топлива. Следовательно, линия 2 наибольшей экономичности является геометрическим местом максимумов кривых постоянного удельного расхода топлива. На фиг. 6 кривая 1 по-

казывает зависимость $M_d = f(n)$, подсчитанную по пунктирной кривой фиг. 5. Только при высоких скоростях выгодно работать с максимальной подачей топлива, при скоростях менее $0,8 n_n$ для снижения удельного расхода топлива следует уменьшать подачу.

Аналогичные кривые $N_e = f(n)$ при различных удельных расходах топлива для дизеля 1000 л. с., 1500 об/мин, применяемого в современных западногерманских поездных тепловозах V-200 и V-80, приведены на фиг. 7, где пунктиром нанесена линия наибольшей экономичности работы. По точкам последней построена на фиг. 6 кривая 2, показывающая зависимость $M_d = f(n)$ при наибольшей экономичности.



Фиг. 7. Зависимость мощности дизеля от угловой скорости при различных значениях удельного расхода топлива в г/л. с. ч. для дизеля 1000 л. с., 1500 об/мин.



Фиг. 8. Внешняя характеристика дизеля Д50 (кривая 1) и зависимость его мощности от угловой скорости при различных значениях удельного расхода топлива в г/л. с. ч.

Кривые, подобные фиг. 5 и 7, для советских тепловозных дизелей отсутствуют. На фиг. 8 приведены кривые зависимости $N_e = f(n)$ при разных удельных расходах топлива для дизеля Д 50 советских тепловозов ТЭ1 и ТЭ2. Кривые построены автором по опытным данным, полученным ЦНИИ МПС при испытании тепловоза ТЭ2, и являются приближенными, так как для получения максимумов пришлось немного экстраполировать опытные кривые. Кривые более пологи в зоне максимумов, но общий характер их таков же, как на фиг. 5 и 7. Внешняя характеристика $N_e = f(n)$ дизеля Д 50 изображена кривой 1. Пунктирная кривая является линией наибольшей экономичности, соответствующая ей зависимость $M_d = f(n)$ представлена кривой 3 (фиг. 6).

Кривые 2 и 3 (фиг. 6) показывают, что для обоих тепловозных дизелей работа по внешней характеристике нецелесообразна, и подачу топлива следует снижать при всех скоростях вращения ниже номинальной.

Из сопоставления кривых 1, 2 и 3 (фиг. 6) следует также, что закон, по которому должна изменяться подача топлива при умень-

шении угловой скорости, существенно различен для дизелей с различными параметрами и конструкцией, даже при одинаковой мощности. Это должно учитываться при выборе характеристик передачи.

Как видно из приведенных выше данных, удельный расход топлива тепловозных дизелей при номинальном режиме составляет 165—190 г/л. с. ч., что соответствует к. п. д. дизеля 33—38%. Экономичность работы дизеля зависит от характера рабочего процесса и способа смесеобразования. Использование предкамер и вихревых камер улучшает распыливание топлива, упрощает конструкцию топливного насоса и форсунки, но вызывает дополнительные потери на перетекание газов из предкамеры и вихревой камеры в цилиндр и обратно. В результате надежность работы дизеля повышается, но к. п. д., как правило, несколько снижается. Повышение степени сжатия увеличивает к. п. д., но предъявляет более высокие требования к материалам и деталям конструкции дизеля (вследствие более высоких температур и давлений).

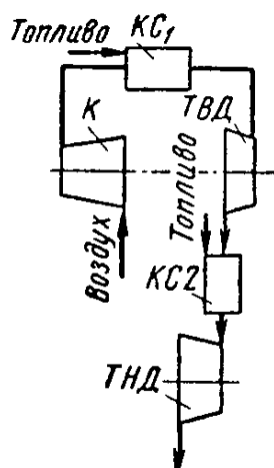
Удельный вес (вес на единицу мощности) мощных тепловозных дизелей в большинстве случаев равен 8—10 кг/л. с. при номинальном числе оборотов 750—1000 в минуту и автотриссных дизелей 4—7 кг/л. с. при номинальном числе оборотов 1200—1500 в минуту.

Удельный вес дизелей зависит главным образом от быстроходности и степени наддува. Увеличение числа оборотов приводит в большинстве случаев к уменьшению срока службы дизеля. Повышение степени наддува не только увеличивает мощность нагнетателя и мощность дизеля, но и повышает к. п. д., улучшает охлаждение клапанов и поршня. Увеличение степени наддува является наиболее прогрессивным направлением усовершенствования дизелей. В современном развитии тепловозных дизелей наблюдается определенная тенденция к повышению быстроходности и степени наддува и снижению удельного веса. Так, фирма Майбах (Западная Германия) выпускает четырехтактные тепловозные дизели 1000 л. с., 1500 об/мин с удельным весом около 4,5 кг/л. с. и намечает повышение его мощности до 1600 л. с. путем увеличения наддува и охлаждения воздуха после нагнетателя со снижением удельного веса до 3,2 кг/л. с. Фирма Фиат (Италия) выпустила новый двухтактный дизель с расходящимися поршнями и горизонтальным расположением цилиндров на 1500 л. с., 1000 об/мин с удельным весом 4,67 кг/л. с. Фирма Нэпир (Англия) выпустила двухтактный дизель «Делтик» с расходящимися поршнями и треугольным расположением цилиндров на 1650 л. с., 1500 об/мин с удельным весом 2,72 кг/л. с. и намечает повышение его мощности увеличением наддува до 2200 л. с. со снижением удельного веса до 1,92 кг/л. с. Чтобы избежать увеличения средней скорости поршня, влияющей на износ частей двигателя, часто прибегают к уменьшению размеров цилиндра и хода поршня и увеличению числа цилиндров. Это усложняет обслуживание, но обеспечивает срок службы в допустимых пределах при повышении быстроходности.

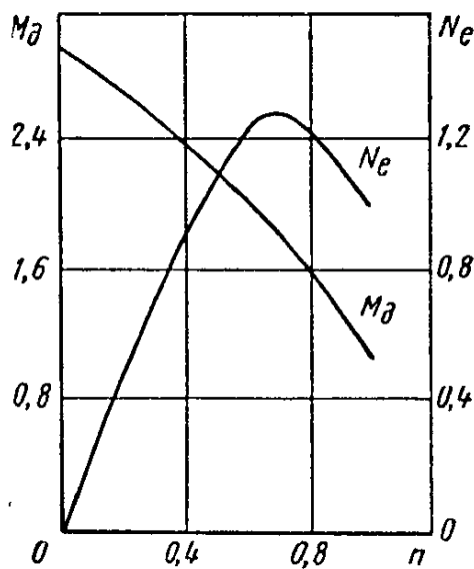
В Советском Союзе ведется разработка новых, мощных дизелей; повышается наддув и вводится охлаждение воздуха после нагнетателя.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Газотурбинные установки отличаются большим разнообразием: одновальные, двухвальные и трехвальные установки с одним или несколькими компрессорами разного давления или с несколькими турбинами; с регенерацией или без нее; с горением при постоянном давлении или при постоянном объеме; с разомкнутым или замкнутым



Фиг. 9. Принципиальная схема двухвальной газотурбинной установки:
К — компрессор; КС1, КС2 — камеры сгорания; ТВД — турбина высокого давления; ТНД — турбина низкого давления.



Фиг. 10. Зависимость мощности и крутящего момента силовой турбины от числа оборотов для двухвальной газотурбинной установки 180 л. с.

циклом и т. д. В зависимости от схемы устройства существенно изменяются свойства, экономичность и характеристики газотурбинных дизелей.

До настоящего времени на транспорте нашли применение одновальные и двухвальные установки разомкнутого цикла с горением при постоянном давлении.

В двухвальной установке (фиг. 9) имеются две газовые турбины: одна турбина высокого давления ТВД служит только для привода компрессора К; другая турбина низкого давления (силовая) ТНД является собственно двигателем, совершающим полезную работу. Если расход топлива в камере сгорания КС1 и угловая скорость n_k компрессора сохраняются неизменными, температура и давление рабочих газов, входящих в силовую турбину, остаются постоянными.

Увеличение угловой скорости n силовой турбины сопровождается уменьшением крутящего момента M_d , развиваемого ею. На фиг. 10 показаны относительные характеристики эффективной мощности $N_e = f(n)$ и момента $M_d = f(n)$ на валу силовой турбины двухваль-

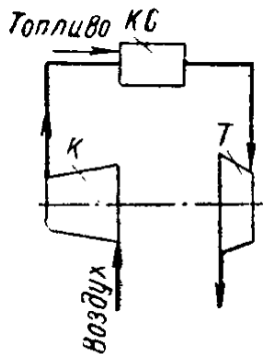
ной установки Беинг мощностью 180 л. с., примененной в газотурбовозе с механической передачей (США). Двигатель развивает при пуске с остановки максимальный момент, превышающий номинальный почти в 3 раза. Мощность достигает максимального значения при $n = 0,7$, после чего несколько падает. В зависимости от параметров и конструктивного выполнения турбины форма характеристики может изменяться, однако общий характер ее сохраняется. В связи с затруднениями в размещении двухвальные установки до сего времени мало применяются в локомотивах, а чаще — на судах.

В выполненных мощных газотурбовозах применены одновальные газотурбинные установки (фиг. 11), в которых компрессор К приводится от той же газовой турбины Т, от которой отбирается полезная мощность. Эффективная мощность N_e на валу одновальной установки равна разности между мощностью газовой турбины N_T и мощностью N_K , потребляемой компрессором и вспомогательными механизмами, необходимыми для работы установки (топливный насос и т. д.).

Одновальная установка не может работать с постоянным расходом топлива при переменной угловой скорости, так как уменьшение угловой скорости снижает количество воздуха, поступающего в камеру сгорания, коэффициент избытка воздуха снижается и при неизменном расходе топлива температура рабочих газов повышается. Для увеличения к. п. д. и мощности газотурбинные установки рассчитываются на предельно допустимую (по жаростойкости лопаток) температуру газов при номинальной угловой скорости, увеличение которой недопустимо. Поэтому система регулирования одновальной установки выполняется так, что при снижении угловой скорости уменьшается расход топлива.

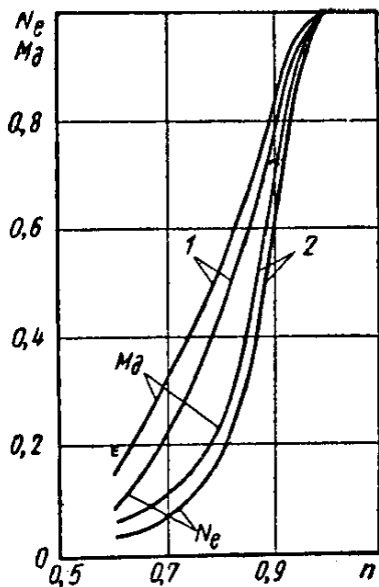
На фиг. 12 даны относительные расчетные характеристики одновальной газотурбинной установки 3750 л. с., спроектированной МВТУ имени Баумана и Коломенским тепловозостроительным заводом имени В. В. Куйбышева для первого советского газотурбовоза, при постоянной температуре T_3 газов, поступающих в турбину (кривые 1). Однако расчеты показали, что режим постоянной температуры не является оптимальным по экономичности двигателя. Для обеспечения

меньшего расхода топлива нужно изменять расход топлива по



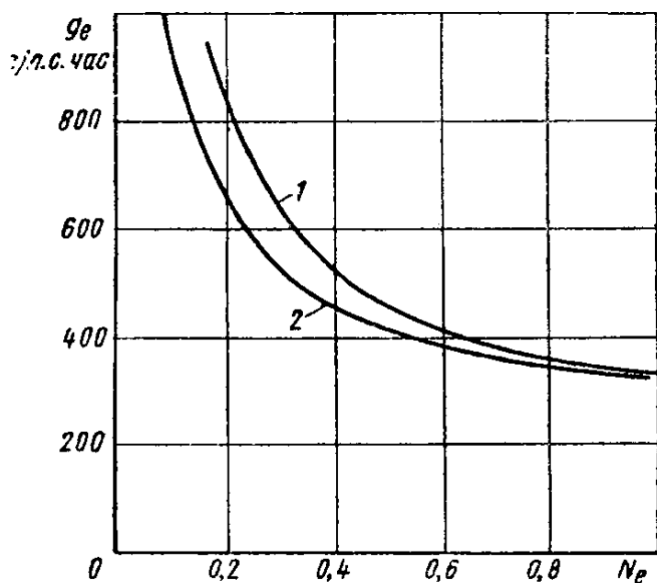
Фиг. 11. Принципиальная схема одновальной газотурбинной установки:

К — компрессор;
КС — камера сгорания;
Т — турбина.



Фиг. 12. Расчетные характеристики одновальной газотурбинной установки 3500 л. с. при постоянной температуре рабочих газов (кривые 1) и при наибольшей экономичности (кривые 2).

иному закону. Кривые 2 (фиг. 12) представляют собой расчетные характеристики $N_e = f(n)$ и $M_d = f(n)$ при наибольшей экономичности газотурбинной установки.

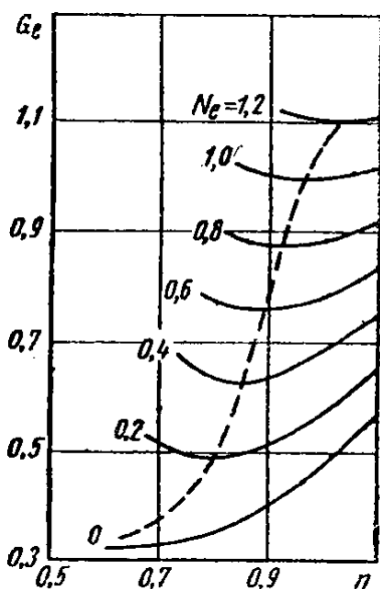


Фиг. 13. Зависимость удельного расхода топлива газотурбинной установки 3750 л. с. от мощности при постоянной температуре рабочих газов (кривая 1) и при наибольшей экономичности (кривая 2).

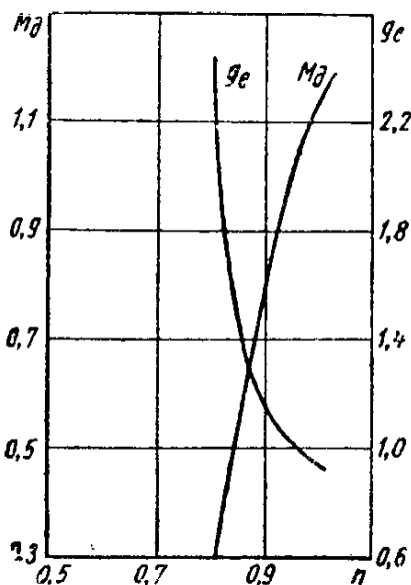
Характеристики удельного расхода топлива g_e в зависимости от мощности, показывающие относительное изменение экономичности двигателя при пониженной мощности для обоих способов регулирования, приведены на фиг. 13.

На фиг. 14 представлены опытные кривые зависимости часового расхода топлива G_e от угловой скорости n при различных значениях эффективной мощности N_e для газовой турбины газотурбовоза ДЖИИ (США), причем за единицу приняты $N_e = 5000$ л. с., $n = 6700$ об/мин и расход топлива, соответствующий этому режиму [27]. Пунктирная линия является геометрическим местом минимумов часового расхода топлива для каждой мощности и, следовательно, определяет наиболее экономичные режимы работы двига-

теля. По этим точкам построены кривые $M_d = f(n)$ и $g_e = f(n)$ (фиг. 15). Как видно из характеристик фиг. 12 и 15, одновальные газо-



Фиг. 14. Зависимость часового расхода топлива газотурбинной установки 5000 л. с. от угловой скорости при различных значениях эффективной мощности.



Фиг. 15. Зависимость крутящего момента и удельного расхода топлива газотурбинной установки 5000 л. с. от угловой скорости при наибольшей экономичности.

теля. По этим точкам построены кривые $M_d = f(n)$ и $g_e = f(n)$ (фиг. 15). Как видно из характеристик фиг. 12 и 15, одновальные газо-

турбинные двигатели, подобно дизелям, могут работать в ограниченной зоне угловых скоростей, причем минимальная угловая скорость относительно выше, чем у дизелей, и составляет $(0,4—0,5) n_n$. При меньших скоростях момент турбины (вследствие уменьшения расхода топлива) меньше момента сопротивления компрессора и потерь, и двигатель работать не может. Крутящий момент двигателя резко падает при уменьшении угловой скорости, а удельный расход топлива быстро возрастает. Рабочий диапазон угловых скоростей зависит также от мощности вспомогательных механизмов, приводимых от двигателя. В новом газотурбовозе мощностью 8500 л. с. (США), где все вспомогательные механизмы приводятся от вспомогательного дизеля, $n_{\min} = 0,25 n_n$ (по проекту).

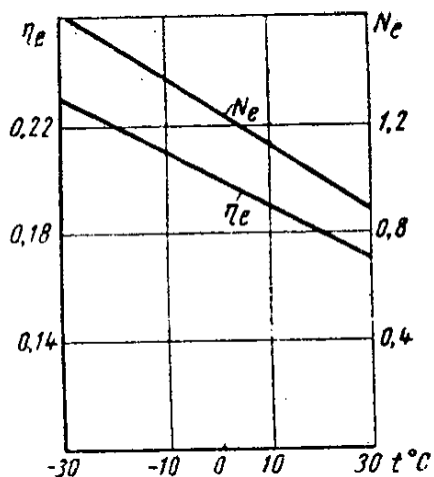
Характерной особенностью газотурбинной установки является существенная зависимость мощности и к. п. д. от температуры наружного воздуха (фиг. 16). Например, при понижении температуры от $+20$ до -20°С мощность N_e увеличивается в 1,5 раза, а к. п. д. — в 1,22 раза.

Газотурбинные установки в настоящее время существенно уступают дизелям по к. п. д. Для выполненных газотурбовозов к. п. д. составляет 0,17—0,2 при номинальном режиме и резко падает при снижении угловой скорости. Однако в перспективе можно ожидать значительного увеличения к. п. д. за счет повышения температуры рабочих газов, для чего необходимо увеличение термостойкости лопаток и жидкостное охлаждение их. Применение нескольких ступеней сжатия воздуха с промежуточным охлаждением и использование тепла отходящих газов для подогревания воздуха, поступающего в компрессор, также повышает к. п. д. установки, но громоздкость охладителей и подогревателей затрудняет применение их в локомотивах.

Удельный вес современных локомотивных газотурбинных установок составляет 2,3—3,2 кг/л. с.; увеличение температуры рабочих газов позволит снизить удельный вес, поэтому это мероприятие является наиболее прогрессивным.

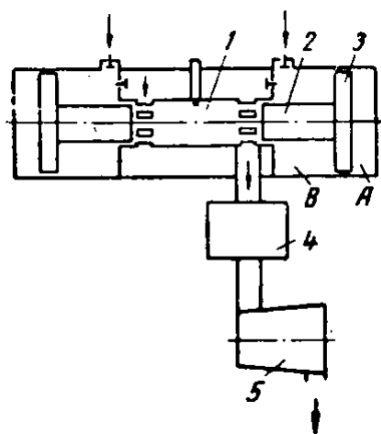
В последнее время у нас и за границей ведутся работы по разработке газотурбинных двигателей с механическим генератором газа.

Такая система, предложенная еще в 1912 г. одним из первых советских специалистов по тепловозной тяге А. Н. Шелестом, позволяет повысить к. п. д. двигателя и улучшить его характеристики. Механический генератор газов со свободно движущимися поршнями (фиг. 17) подобен по конструкции двухтактному дизелю с расходящимися поршнями, но он не производит полезной механической



Фиг. 16. Зависимость мощности и к. п. д. газотурбинной установки от температуры наружного воздуха.

работы, а служит для получения газов высокого давления. Топливо впрыскивается в цилиндр 1, как в двухтактном дизеле, когда поршни 2 сближаются. Газы, образующиеся в результате сгорания топлива, раздвигают поршни 2 и, когда открываются окна, поступают в ресивер



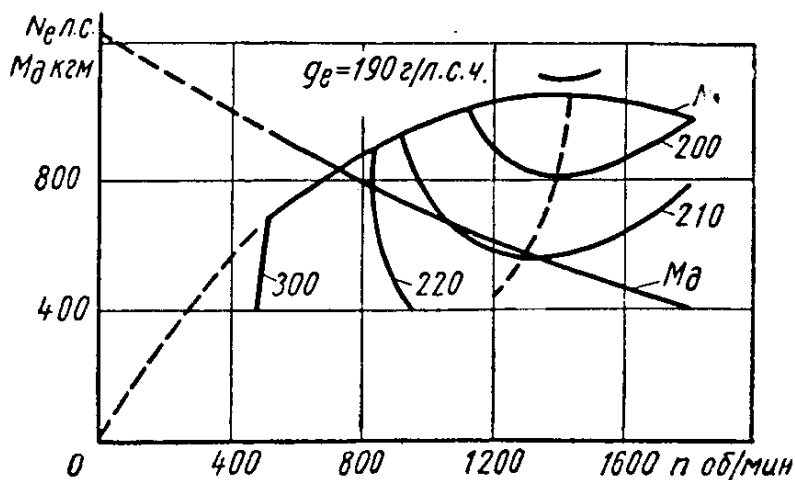
Фиг. 17. Принципиальная схема газотурбинной установки с механическим генератором газов:

1 — цилиндр; 2 — рабочие поршни; 3 — возвращающие поршни; 4 — ресивер; 5 — газовая турбина; А — камера сжатия; В — пространство для впуска воздуха.

4 и затем в газовую турбину 5. Поршни 3, раздвигаясь, сжимают воздух в камерах А и создают разрежение в пространстве В, куда впускается свежий воздух от нагнетателя. Когда давление в цилиндре 1 падает, поршни под давлением сжатого воздуха в камерах А перемещаются к внутренней мертвой точке, заряжая воздухом цилиндр 1 через клапаны (пока открыты окна) и сжимая воздух при дальнейшем перемещении.

На фиг. 18 приведены характеристики $N_e = f(n)$ и $M_d = f(n)$ двигателя газотурбовоза Рено-Пескара № 5070 (Франция), выполненного по схеме фиг. 17 в 1952 г. Как у двухвального газотурбинного двигателя, максимальный крутящий момент превышает более чем в 3 раза номинальный момент. На этой же фигуре нанесены кривые зависимости $N_e = f(n)$ при постоянных значениях удельного

расхода топлива g_e и пунктиром проведена кривая наибольшей экономичности работы газовой турбины. Работа по внешней характеристике целесообразна лишь при полной мощности; при мощности



Фиг. 18. Характеристики газовой турбины Рено-Пескара с механическим генератором газов.

ниже 1000 л. с. желательно снижение подачи топлива и повышение числа оборотов (по сравнению с внешней характеристикой) по штриховой линии, являющейся кривой наибольшей экономичности. Максимальный к. п. д. установки достигает 0,32.

Недостатком описанной системы является громоздкость и сложность установки.

5. УСЛОВИЯ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ПЕРЕДАЧЕ

В паровозах и электровозах двигатели соединены с колесными парами с помощью передаточного механизма с постоянным передаточным отношением (зубчатой передачи, кривошипно-шатунного механизма и т. д.), который для краткости называется постоянной передачей. Гребные винты судов и воздушные винты самолетов часто соединяются с тепловыми двигателями непосредственно или также через постоянную передачу.

С другой стороны, в автомобилях, тракторах и ряде локомотивов тепловые двигатели соединяются с движущими колесами через передачу с переменным передаточным отношением (переменную передачу).

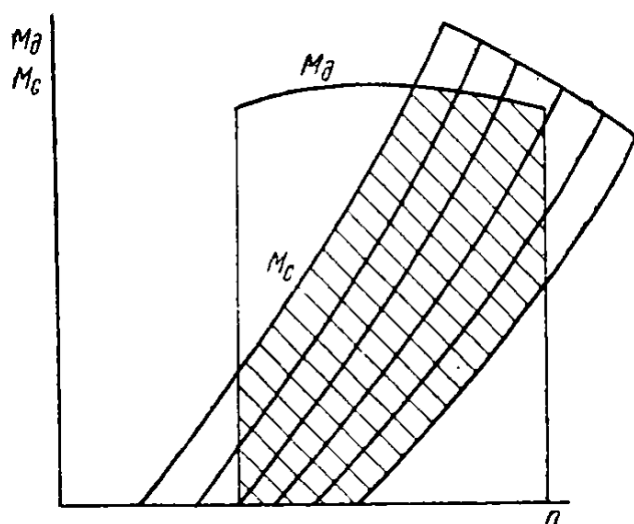
Для выяснения роли передачи, рассмотрим сначала общие условия совместной работы теплового двигателя и исполнительного механизма в установившемся режиме при постоянной передаче. Для того чтобы совместная работа была возможна и отвечала условиям эксплуатации исполнительного механизма при минимальных размерах двигателя, к нему должны быть предъявлены определенные требования, связанные с характеристиками двигателя и исполнительного механизма: 1) двигатель должен обеспечить работу исполнительного механизма в наибольшем диапазоне режимов, встречающихся в эксплуатации; 2) нужно добиться полного использования двигателя в наибольшем диапазоне работы исполнительного механизма; 3) обеспечить устойчивость работы агрегата при всех эксплуатационных режимах и 4) пусковые характеристики двигателя должны в наибольшей степени удовлетворять условиям пуска исполнительного механизма.

Степень выполнения этих требований можно выяснить путем сопоставления характеристик крутящего момента двигателя и момента сопротивления исполнительного механизма. При постоянном передаточном отношении крутящий момент на входном валу исполнительного механизма и угловая скорость его жестко связаны с моментом и угловой скоростью двигателя. Поэтому характеристика крутящего момента на входном валу в зависимости от угловой скорости отличается от характеристики двигателя лишь масштабом (если пренебречь к. п. д. передачи), а при использовании относительных характеристик повторяет последнюю. Вид характеристики крутящего момента зависит от типа и способа управления двигателем и, например, для дизеля может быть представлен семейством характеристик $M_d = f(n)$ (фиг. 2 или 3).

Момент сопротивления исполнительного механизма зависит в общем случае от угловой скорости и условий работы (нагрузки) и также может быть представлен семейством кривых $M_c = f(n)$ (фиг. 19). Если момент сопротивления при изменении условий работы меняется плавно, то эксплуатационные режимы исполнительного механизма заключены в области, ограниченной предельными характеристиками $M_c = f(n)$. Предельные характеристики $M_d = f(n)$ и $M_c = f(n)$ (фиг. 19) ограничивают область совместной работы двигателя и исполнительного механизма (заштрихованная площадь).

Первое из перечисленных выше требований сводится к тому, чтобы возможно большая часть области режимов работы исполнительного механизма находилась внутри области допускаемых режимов работы двигателя. Это всегда может быть выполнено путем расширения последней, т. е. увеличением мощности двигателя. Однако при этом увеличиваются его вес и размеры, что противоречит второму требованию — повышению степени использования двигателя при различных режимах.

Если крутящий момент и момент сопротивления при определенных условиях работы зависят только от угловой скорости, как это может быть принято, например, для крутящего момента дизеля



Фиг. 19. Зависимости крутящего момента двигателя и момента сопротивления от угловой скорости.

при постоянной подаче топлива, то необходимое условие устойчивости работы, как известно, определяется неравенством

$$\frac{d(M_d - M_c)}{dn} < 0. \quad (1)$$

Геометрически это неравенство означает, что кривая $M_d - M_c = f(n)$ должна быть падающей. Чем круче падает эта кривая, т. е. чем больше угол между характеристиками M_d и M_c , тем больше запас устойчивости.

Следовательно, в этом случае устойчивость работы зависит от взаимного расположения статических характеристик двигателя и

исполнительного механизма. В большинстве случаев условия устойчивой работы являются более сложными. Однако взаимное расположение статических характеристик оказывает существенное влияние на условия устойчивости. Требования в отношении пуска в основном заключаются в обеспечении достаточной разности $M_d - M_c$ для создания максимального ускорения и возможности изменения этой разности в широких пределах для обеспечения плавного пуска при различных нагрузках.

При расчетах движения поезда вместо крутящего момента M_d и момента сопротивления M_c пользуются силой тяги F и сопротивлением W движению поезда, отнесенными к ободу движущих колес. Между моментом M_d двигателя и силой тяги F , скоростью вращения n вала двигателя и скоростью v движения поезда при постоянном передаточном отношении μ между валом двигателя и колесами (при условии пренебрежения потерями в передаче) имеются известные соотношения:

$$v = 0,188 \frac{D_k n}{\mu} \text{ км/час}, \quad (2)$$

$$F = \frac{2\mu M_d}{D_k} \text{ кг}, \quad (3)$$

где D_k — диаметр движущего колеса по кругу катания в м.

Таким образом, тяговая характеристика локомотива в относительных единицах повторяет относительную характеристику двигателя.

Удельное сопротивление подвижного состава подсчитывается по опытным формулам типа

$$W = Q(a + b v + c v^2 \pm i) \text{ кг,} \quad (4)$$

где a, b, c — постоянные коэффициенты;

Q — вес подвижного состава в t ;

i — сопротивление уклона пути в ‰.

Третий член в скобке при скоростях ниже 100 км/час относительно мал и характеристики сил сопротивления поезда близки к прямым, очень незначительно поднимающимся с увеличением скорости.

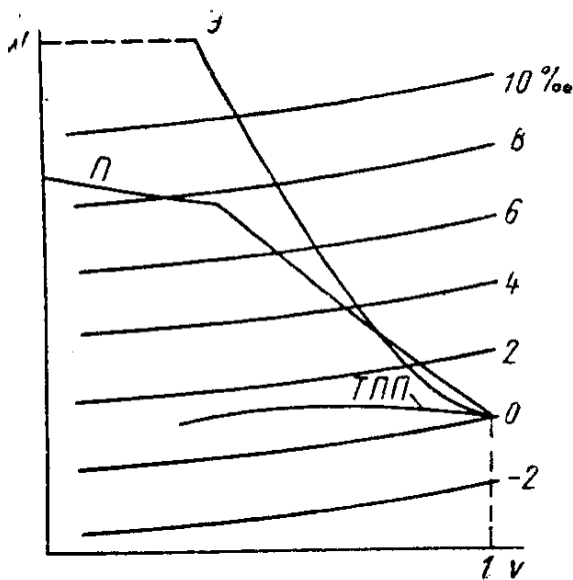
Основными тяговыми параметрами локомотива являются расчетная сила тяги при движении на руководящем подъеме, наибольшая скорость движения при расчетной силе тяги и максимальная рабочая скорость локомотива, которая в большинстве случаев соответствует движению на горизонтальном участке или спуске.

Поскольку номинальным режимом теплового двигателя является режим наибольшей угловой скорости, удобно для относительной тяговой характеристики принять максимальную скорость движения за единицу.

На фиг. 20 приведены типичные характеристики сил сопротивления движению поезда при разных уклонах и предельная тяговая характеристика тепловоза ТПП с постоянной передачей, выбранной так, что полная мощность дизеля соответствует максимальной скорости на горизонтальном пути.

Можно заметить две отличительные особенности характеристик сопротивления движению: сила сопротивления движению поезда относительно мало изменяется в зависимости от скорости движения и резко изменяется в зависимости от условий движения (профиля пути). Именно эти две особенности сил сопротивления обусловили практическую непригодность дизеля в качестве тягового двигателя при постоянной передаче.

Это становится особенно ясным при сравнении такого тепловоза с другими локомотивами, например, паровозом П и электровозом постоянного тока Э, относительные тяговые характеристики которых также приведены на фиг. 20. Для удобства сравнения за расчетный



Фиг. 20. Зависимость сопротивления движению поезда от скорости при различных уклонах пути и тяговые характеристики паровоза (П), электровоза (Э) и тепловоза с постоянной передачей (ТПП).

режим паровоза и электровоза принят, как и для тепловоза, режим максимальной скорости движения.

Паровоз и электровоз удовлетворяют указанным выше требованиям к двигателю. Они обеспечивают возможность движения поезда в широком диапазоне изменения профиля пути. Мощность паровоза используется почти полностью при относительно большом диапазоне скоростей движения. Мощность электровоза несколько падает с увеличением скорости, однако это падение невелико, и в некоторых типах электровоза возможно использование полной мощности при различных скоростях. Условие устойчивости выполняется при всех режимах движения, причем большой угол между характеристиками силы тяги и сил сопротивления способствует увеличению запаса устойчивости. Пусковые характеристики паровоза и, в особенности, электровоза также благоприятны, так как обеспечивают максимальную силу тяги при скорости, равной нулю, причем эта сила тяги может быть при желании снижена до малой величины.

Иные результаты получаются у тепловоза с постоянной передачей. При заданных условиях он может работать лишь на легких профилях. Если же выбрать дизель по максимальной силе тяги, подобно паровозу или электровозу, номинальная мощность дизеля будет в несколько раз больше их номинальной мощности. Полная мощность дизеля используется лишь при максимальной скорости движения. Условие устойчивости выполняется лишь при больших скоростях, причем запас устойчивости мал вследствие малого угла между характеристиками тепловоза и сил сопротивления. При малых скоростях возможна потеря устойчивости. Пусковые характеристики рассматриваемого тепловоза также неблагоприятны. Пуск дизеля при соединении его с колесами практически неприемлем, так как для этого потребовался бы вспомогательный двигатель с большим крутящим моментом. Следовательно, вал дизеля должен соединяться с колесами через муфту сцепления, которая при пуске дизеля должна выключаться, а при пуске поезда момент дизеля должен передаваться за счет сил трения при скольжении в муфте сцепления. Наконец, сила тяги при пуске не больше, чем при установившемся движении, и не обеспечивает достаточного ускорения.

Все эти недостатки (даже в еще большей степени) свойственны и одновальному газотурбинному двигателю при постоянной передаче. Это объясняет, почему тепловозы и газотурбовозы с постоянной передачей практического применения не нашли и многочисленные попытки создания их окончились неудачей. Двухвальный газотурбинный двигатель имеет более благоприятные характеристики, однако и он не может удовлетворить всем требованиям при постоянной передаче вследствие сравнительно узкого диапазона изменения момента.

ГЛАВА III.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ

6. ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ

Введение передачи с переменным передаточным отношением между тепловым двигателем и движущими колесами позволяет устранить основные недостатки, выявленные при постоянной передаче. Изменение передаточного отношения может быть ступенчатым (механическая и отчасти гидромеханическая передача) или плавным (гидравлическая, электрическая и газовая передачи).

Изменение передаточного отношения позволяет увеличить максимальную силу тяги по сравнению с номинальной (без увеличения мощности дизеля). Для этой цели передаточное отношение между валом двигателя и движущими колесами должно быть увеличено от значения μ_1 , соответствующего максимальной скорости v_{\max} , до некоторого значения μ_2 , при котором может быть получена максимальная сила тяги F_{\max} , ограничиваемая сцеплением.

Для того чтобы при обоих режимах можно было использовать полную мощность двигателя, необходимо так выбрать μ_1 и μ_2 , чтобы при F_{\max} и v_{\max} дизель работал в номинальном режиме ($M_{\partial n}$, n_n). Пользуясь равенствами (2) и (3), получим (пренебрегая потерями в передаче) следующие соотношения для предельных режимов движения:

$$n_n = \frac{v_{\max} \mu_1}{0,188 D_k}, \quad (5)$$

$$M_{\partial n} = \frac{F_{\max} D_k}{2 \mu_2}, \quad (6)$$

$$N_{en} = \frac{M_{\partial n} n_n}{716} = \frac{F_{\max} v_{\max}}{270} \frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{N'_e}{k_\mu}, \quad (7)$$

где $k_\mu = \frac{\mu_2}{\mu_1}$ — коэффициент изменения передаточного отношения;

N'_e — мощность двигателя, необходимая при постоянной передаче, т. е. при $\mu_2 = \mu_1$.

Из равенства (7) следует, что при увеличении коэффициента k_μ уменьшается требуемая мощность теплового двигателя, если

заданы F_{\max} и v_{\max} . При заданной мощности двигателя увеличение k_{μ} расширяет пределы изменения силы тяги и скорости движения.

Если передаточное отношение может изменяться плавно во время движения поезда от значения μ_2 , соответствующего максимальной силе тяги, до μ_1 при движении с максимальной скоростью, то при любой скорости движения в промежутке между этими двумя режимами может быть реализована полная мощность теплового двигателя. При этом

$$Fv = 270 N_{en} = \text{const.} \quad (8)$$

Пренебрегая изменением к. п. д. передачи, можно представить тяговую характеристику локомотива равнобокой гиперболой, ограниченной максимальной силой тяги и максимальной скоростью движения.

Если обозначить силу тяги F_{\min} при скорости v_{\max} и F_{\max} при v_{\min} , то из равенств (7) и (8) следует, что $k_{\mu} = \frac{F_{\max}}{F_{\min}} = \frac{v_{\max}}{v_{\min}}$, т. е. коэффициент изменения передаточного отношения характеризует

также диапазон изменения силы тяги и скорости при полной мощности двигателя и может быть назван также коэффициентом изменения силы тяги.

При заданном весе локомотива максимальная сила тяги F_{\max} , ограничиваемая сцеплением, несколько уменьшается с увеличением скорости. Площадь $OABC$ (фиг. 21) включает в себе все режимы движения, допустимые при заданных пределах F_{\max} и v_{\max} . Они могут быть реализованы, если мощность двигателя соответствует точке B , т. е. при $k_{\mu} = 1$. При этом по формуле (7) $N_{en} = N'_e$. Линия ABC представляет предельную тяговую характеристику для этого случая.

При $k_{\mu} = 2$ мощность теплового двигателя равна $N_{en} = 0,5 N'_e$.

Фиг. 21. Предельные тяговые характеристики тепловоза при различных значениях мощности теплового двигателя.

Предельной тяговой характеристикой является линия $ADEC$. Обе характеристики ABC и $ADEC$ обеспечивают возможность движения одного и того же поезда по участку с заданным профилем пути и в обоих случаях могут быть реализованы максимальная сила тяги по сцеплению и максимальная скорость. Таким образом, подбором передачи и коэффициента k_{μ} можно при пониженной мощности двигателя удовлетворить основные требования эксплуатации. Однако при характеристике $ADEC$ скорости движения в зоне DE ниже, чем в первом случае, и, следовательно, производительность

локомотива (измеряемая, например, в *ткм/час*) также понижена. Это приведет к уменьшению пропускной способности участка дороги.

Поэтому повышение мощности двигателя без существенного увеличения веса локомотива остается одной из главных задач в развитии подвижного состава с тепловыми двигателями и при переменной передаче.

С увеличением мощности двигателя растет мощность передачи. Однако размеры и вес передачи зависят главным образом от значений F_{\max} и v_{\max} и при заданных их значениях относительно мало изменяются. Диапазон изменения силы тяги и скорости при полной мощности, определяемый величиной k_{μ} , при заданных F_{\max} и v_{\max} , уменьшается с увеличением мощности двигателя. Поскольку величина F_{\max} пропорциональна сцепному весу локомотива, с уменьшением удельного веса локомотива (веса на единицу мощности) при заданных N_e и v_{\max} уменьшается требуемое значение k_{μ} .

Величина k_{μ} выбирается также в зависимости от назначения подвижного состава. Для быстроходных пассажирских локомотивов и автомотрисс весьма важно снижение веса и повышение мощности. При больших скоростях сопротивление движению резко изменяется с изменением скорости; снижение сопротивления от подъема частично компенсируется увеличением сопротивления воздушной среды и поэтому сила тяги и скорость при изменении профиля пути меняются в относительно узких границах. Следовательно, k_{μ} получается малым. Наименьший k_{μ} требуется для дизель-поездов и автомотрисс, где состав поезда постоянен и вес его почти не изменяется.

Маневровый локомотив должен развивать большую силу тяги при малых скоростях и иметь возможность быстро перемещаться без поезда. Вес обрабатываемого состава меняется в широких пределах. Поэтому диапазон изменения силы тяги и скорости у маневрового локомотива должен быть большим, в то время как практически реализуемая мощность мала. Следовательно, его целесообразно выполнять с большим значением k_{μ} и малой мощностью двигателя. Переменная передача позволяет это осуществить.

Грузовые локомотивы занимают промежуточное положение.

Таким образом, в зависимости от назначения подвижного состава и уровня его выполнения предельная тяговая характеристика его подобна одной из кривых семейства (см. фиг. 21). Эта характеристика определяется тяговыми параметрами локомотива (F_{\max} , v_{\max}) и мощностью теплового двигателя и не зависит от типа и характеристик передачи.

Практически ни одна из передач не может полностью реализовать предельной характеристики из-за: а) потерь в передаче, б) ограничения режимов работы передачи и в) отклонения характеристики передачи от кривой, соответствующей постоянной мощности дизеля.

Приближение действительной тяговой характеристики к предельной является одной из главных задач при выборе и проектировании передачи мощности от теплового двигателя к движущим

колесам. Очень важно, особенно для грузовых локомотивов, максимальное приближение характеристики к предельной в зоне средних скоростей, которые наиболее часто встречаются в эксплуатации. В этой зоне передача должна работать так, чтобы при изменении силы тяги и скорости движения режим работы теплового двигателя сохранялся неизменным. Существенное значение, в особенности для пассажирских локомотивов и дизель-поездов, имеет доведение использования полной мощности до точки E максимальной скорости. Важно также, чтобы сила тяги при пуске достигала значений, близких к пределу по сцеплению, и возможно меньше изменялась в процессе пуска. Выполнение этого условия повышает использование сцепного веса, увеличивает ускорение и обеспечивает наиболее быстрый выход на характеристику постоянной мощности в процессе пуска поезда.

В связи с разнообразием условий пуска и движения поезда часто требуются значения силы тяги или скорости меньшие, чем по предельной характеристике. В системе управления должна быть предусмотрена возможность уменьшения реализуемой мощности путем воздействия на тепловой двигатель или изменения параметров передачи и создания таким образом семейства тяговых характеристик. Благодаря увеличению количества характеристик, определяемого числом положений органа управления, в общем случае повышается гибкость управления поездом и достигаются более плавные переходы с одного режима работы на другой.

Экономичность работы теплового двигателя при пониженной мощности, как указывалось, зависит от характера изменения крутящего момента M_d и угловой скорости n . Зависимость $M_d = f(n)$ при изменении положения органа управления определяется свойствами системы регулирования теплового двигателя и характеристиками передачи.

Следовательно, при выборе типа передачи и ее проектировании необходимо учитывать и это обстоятельство.

При разработке подвижного состава с тепловыми двигателями должны соблюдаться следующие основные требования:

1. На подвижном составе нужно установить двигатель возможно большей мощности при заданных размерах и весе. Одновременно должны быть обеспечены возможно меньшая стоимость и больший срок службы, надежность и экономичность работы всех узлов локомотива.

2. Мощность теплового двигателя должна передаваться движущим колесам через передачу с переменным передаточным отношением, обеспечивающую по возможности плавное изменение силы тяги и скорости в возможно более широких пределах.

3. Необходимо обеспечить максимальное использование мощности теплового двигателя в пределах режимов от наибольшей силы тяги до скорости, наиболее близкой к конструкционной.

4. Пусковые характеристики должны обеспечить полное использование сцепного веса до наибольшей возможной по мощности двигателя скорости.

5. Следует предусмотреть многоступенчатое или плавное изменение силы тяги при пуске и реализуемой мощности во время движения, причем изменение мощности в зависимости от числа оборотов должно возможно ближе соответствовать линии наибольшей экономичности теплового двигателя.

6. Нужно избегать толчков силы тяги в процессе пуска, в особенности для грузовых локомотивов.

7. Управление подвижным составом должно быть наиболее простым и наглядным и осуществляться минимальным числом рукояток и манипуляций с ними.

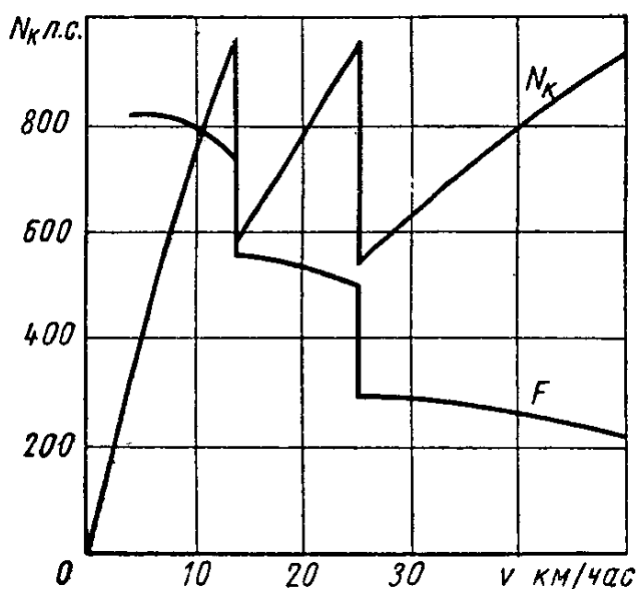
Выполнение первого — главного из этих требований зависит от выбора и конструкции всех основных элементов подвижного состава: двигателя, передачи, вспомогательных устройств и механической части. Выполнение остальных требований зависит больше всего от передачи.

Ниже рассмотрены принципиальные характеристики различных передач.

7. МЕХАНИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА

Механическая передача состоит из: а) муфты сцепления вала двигателя с входным валом передачи, б) комплекта зубчатых передач с различными передаточными отношениями (коробки передач), в) реверсивной передачи (при нереверсируемом двигателе) и г) соединения выходного вала передачи с движущими колесами (кривошипно-шатунного соединения, карданного соединения и т. п.). Для включения и выключения отдельных зубчатых пар в коробке передач применяются муфты трения с электромагнитным, пневматическим или другим приводом. При планетарной передаче для затормаживания одного из элементов передачи используются тормоза с тем или иным приводом.

Мощность двигателя при движении поезда передается колесам через одну из зубчатых пар в зависимости от включения муфт ступеней передачи. На каждой данной ступени передачи тяговая характеристика повторяет характеристику теплового двигателя (фиг. 22), но с измененным масштабом, зависящим от передаточного отношения μ . Как видно из характеристики, механическая передача обеспечивает возможность движения поезда в широком диапазоне изменения профиля пути и создает большую силу тяги при разгоне



Фиг. 22. Тяговая характеристика теплового двигателя с механической передачей.

поезда. Если значительная часть характеристики двигателя устойчивая, можно при всех скоростях обеспечить устойчивую работу локомотива.

Сила тяги при пуске может изменяться переключением коробки передач и изменением подачи топлива. Для осуществления последнего на тепловом двигателе должен быть установлен двухрежимный регулятор числа оборотов, и орган управления при этом воздействует на подачу топлива.

Механическая передача имеет следующие существенные недостатки. При трогании поезда с места вращающий момент передается через трение скольжения в главной муфте.

Чтобы получить максимальное ускорение, необходима работа двигателя с полной подачей топлива, что при минимальной угловой скорости создает неблагоприятный режим работы для теплового двигателя. В первый момент вся мощность переходит в тепло в муфте сцепления.

Переключение коробки передач во время движения сопровождается потерей силы тяги при выключении муфты и толчком при включении. Это может привести к разрыву поезда, особенно при движении на подъем (как это нередко имело место при эксплуатации тепловоза Э^ч 3). В двигателе перед выключением муфты необходимо уменьшать подачу топлива во избежание резкого повышения угловой скорости при внезапной разгрузке. При включении возможны удары в передаче и двигателе. Управление тепловозом вследствие этого усложняется и требует высокой квалификации машиниста.

Использование полной мощности теплового двигателя возможно только в одной точке для каждой ступени передачи. Поэтому даже при работе по внешней характеристике двигателя (фиг. 22) мощность значительно недоиспользуют. Практически степень использования мощности еще более понижается вследствие сложности и опасности частых переключений коробки передач. Это вынуждает машиниста работать с уменьшенной подачей топлива с тем, чтобы при увеличении крутизны подъема пути иметь возможность увеличивать ее. К. п. д. передачи равен произведению к. п. д. всех зубчатых пар, находящихся в зацеплении, и при хорошем выполнении последних составляет $\eta_n = 0,88 \div 0,94$.

Однако по мере износа зубчатых колес к. п. д. передачи понижается. При работе зубчатых колес в масле добавляются потери на перемешивание масла. Для автомобильных передач принимается в среднем $\eta_n = 0,8 \div 0,85$.

К недостаткам механической передачи относится групповой привод движущих осей.

При механической передаче не обеспечивается наибольшая экономичность работы теплового двигателя при пониженной мощности.

При одновальной газотурбинной установке механическая передача непригодна вследствие резкого снижения силы тяги при снижении скорости на каждой ступени передачи.

8. ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА

Гидравлические передачи делятся на гидростатические, в которых крутящий момент на выходном валу получается главным образом за счет использования давления рабочей жидкости при незначительной скорости ее движения (2—3 м/сек), и гидродинамические (или турбопередачи), в которых момент создается в основном кинетической энергией движущейся жидкости. В подвижном составе применяются главным образом гидродинамические передачи.

В гидродинамической передаче насос и двигатель (турбина) объединены в одну конструкцию. Гидродинамическая муфта имеет два колеса с лопатками — насос и турбину, в рабочем пространстве которых жидкость перемещается по замкнутому кругу. Из теории гидропередач [14] известно, что при таком выполнении крутящий момент с входного вала передается на выходной без изменения, но угловая скорость выходного вала n_T меньше угловой скорости n_H входного вала на величину скольжения, зависящую от приложенного к выходному валу момента сопротивления M_T .

К. п. д. гидромукты равен

$$\eta_{гм} = \frac{n_T}{n_H} = 1 - s, \quad (9)$$

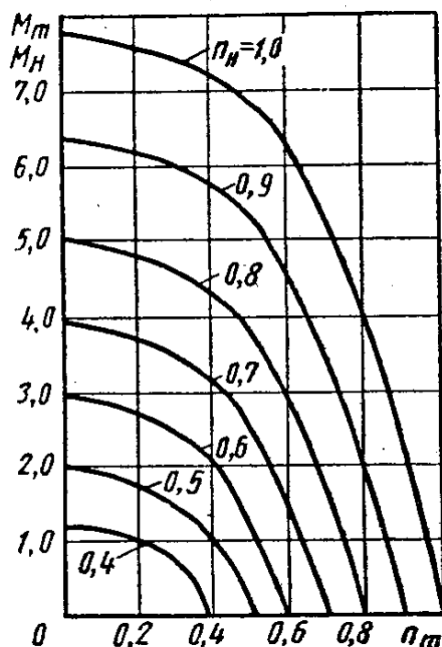
где скольжение $s = \frac{n_H - n_T}{n_H}$.

Гидромукта используется как мукта сцепления и рассчитывается на нормальную работу при скольжении $s = 0,02 \div 0,05$, так что к. п. д. мукты равен $\eta_{гм} = 0,95 \div 0,98$.

На фиг. 23 приведены относительные характеристики гидромукты при различных угловых скоростях входного вала, причем за единицу приняты номинальные момент и угловая скорость входного вала.

Гидромукта имеет то преимущество перед муктами трения, что не требует специальных приводов для сцепления и расцепления и приводится в действие путем наполнения рабочего пространства жидкостью, причем момент плавно увеличивается по мере заполнения мукты. Тепло, рассеиваемое в мукте при пуске поезда, удаляется посредством циркуляции рабочей жидкости и ее охлаждения в холодильнике вне мукты. Наконец, удары и толчки, испытываемые выходным валом, смягчаются жидкостью, предохраняющей от них двигатель.

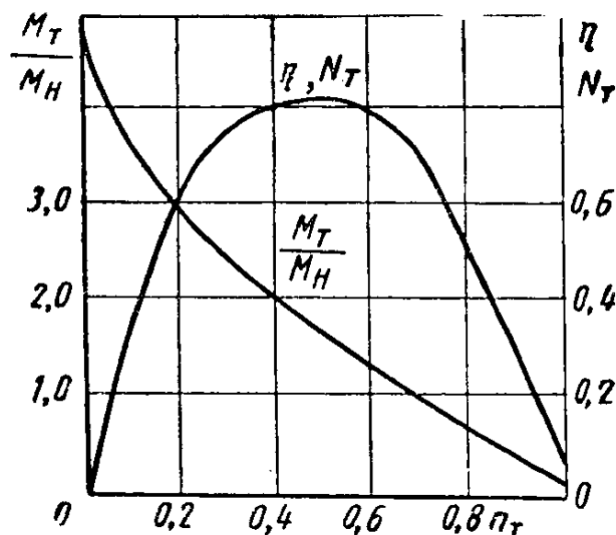
Недостатком гидромукты являются потери мощности, которые отсутствуют в муктах трения при полном сцеплении.



Фиг. 23. Зависимость крутящего момента на выходном валу гидромукты от его угловой скорости при различных угловых скоростях входного вала.

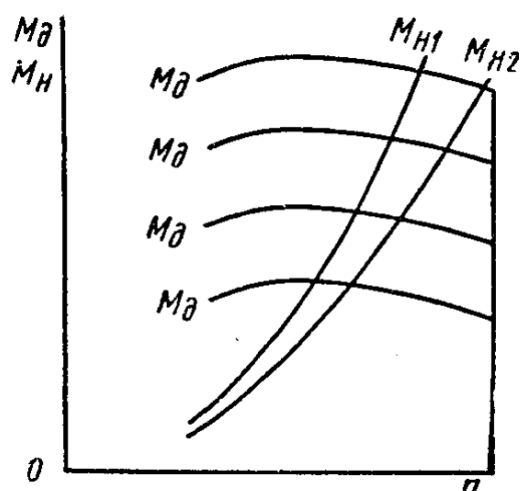
Гидротрансформатор отличается от гидромукты добавлением неподвижного направляющего аппарата, устанавливаемого между выходной кромкой насоса и входом турбины или между выходной кромкой турбины и входом в насос.

Характеристика гидротрансформатора зависит от соотношения между размерами его элементов и формы лопаток. На фиг. 24 приведены типичные кривые зависимости момента M_T , мощности N_T турбины и к. п. д. трансформатора η от угловой скорости n_T турбины при постоянных скорости n_H и моменте M_H насоса. За единицу приняты номинальные значения момента, угловой скорости и мощности насоса. Момент турбины плавно и автоматически изменяется при изменении скорости ее вращения. Вследствие этого изменяется



Фиг. 24. Характеристики гидротрансформатора:

N_T — мощность, M_T — момент и n_T — угловая скорость турбины; η — к. п. д. гидротрансформатора.



Фиг. 25. Зависимость крутящего момента M_d дизеля и момента сопротивления M_{H1} и M_{H2} насоса гидротрансформатора от угловой скорости дизеля.

и момент насоса и его скорость, так же как и скорость жидкости при выходе из турбины. На фиг. 25 приведены характеристики дизеля и насоса (приведенные к валу двигателя) в зависимости от угловой скорости дизеля. Момент насоса пропорционален квадрату угловой скорости и изображается параболой M_{H1} и M_{H2} , соответствующими минимальной и максимальной скорости турбины. Установившийся режим работы соответствует точкам пересечения характеристик и, как видно, меняется при изменении M_H . Подбором формы лопаток удастся это изменение сделать небольшим.

Применение гидротрансформатора значительно улучшает тяговые свойства подвижного состава с тепловыми двигателями. Он позволяет получить повышенный момент при пуске поезда (начиная с остановки), обеспечивает автоматическое изменение силы тяги при движении по пути с переменным профилем, сохраняя почти неизменным режим работы теплового двигателя.

Устойчивость движения поезда обеспечивается падающей характеристикой турбины, устойчивая работа теплового двигателя — возрастающей характеристикой насоса.

Существенным недостатком гидротрансформатора является пониженный к. п. д. и, в особенности, падение его при высоких и малых скоростях. Последнее вынуждает ограничить использование гидротрансформатора узким диапазоном скоростей, недостаточным в условиях железнодорожного транспорта. К. п. д. гидropередачи зависит также от вязкости рабочей жидкости; поэтому он меняется при изменении температуры окружающего воздуха. Максимальные значения к. п. д. современных гидротрансформаторов равны 0,82—0,88.

Максимальную силу тяги при пуске можно получить лишь при максимальной угловой скорости насоса и теплового двигателя. Момент теплового двигателя при этом близок к номинальному. Следовательно, для обеспечения пуска с наибольшим ускорением тепловой двигатель должен развивать при трогании с остановки полную мощность. Так как в первый момент трогания полезная мощность равна нулю, вся мощность расходуется на потери в гидротрансформаторе. Вследствие увеличения потерь в гидротрансформаторе при максимальной силе тяги, этот режим является, как правило, перегрузочным. Длительная сила тяги, ограничиваемая нагревом трансформатора, ниже, чем максимальная. Ее величина определяется размерами трансформатора и интенсивностью охлаждения рабочей жидкости в холодильнике.

В некоторых конструкциях достигнута возможность длительного использования максимальной силы тяги за счет усиления охлаждения. Однако это вызывает увеличение размеров холодильника и потерь на вентиляцию и циркуляцию рабочей жидкости.

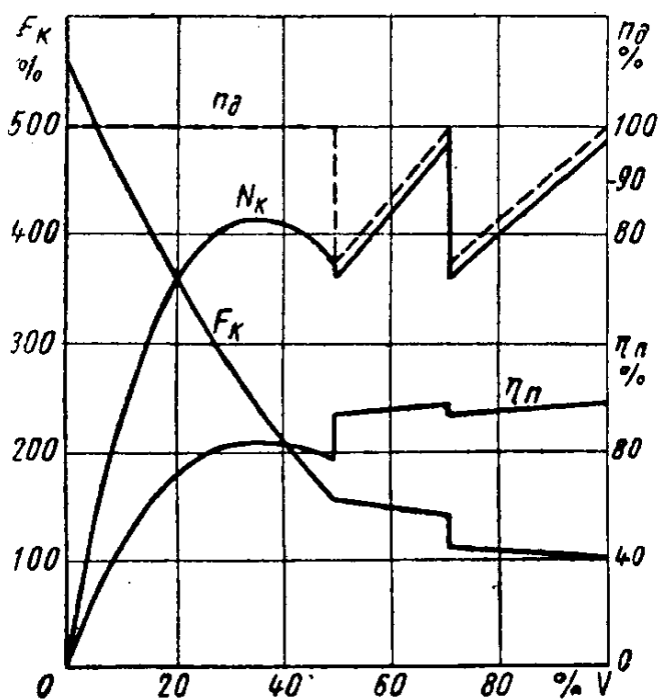
При уменьшении реализуемой мощности теплового двигателя его момент изменяется по кривой M_n (фиг. 25), более крутой, чем линия наибольшей экономичности большинства дизелей. Это приводит к более резкому повышению удельного расхода топлива при работе двигателя с пониженной мощностью.

Групповой привод движущих осей также является недостатком гидropередачи.

9. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА

Малый диапазон изменения момента и угловой скорости гидротрансформатора при удовлетворительной экономичности ограничивает возможность применения чисто гидравлической передачи. Чаще применяется сочетание гидравлической и механической передачи, при котором момент и угловая скорость выходного вала меняются не только гидротрансформатором, но и ступенчатым изменением передаточного отношения зубчатых колес. Такие передачи, часто называемые гидромеханическими, состоят из одного или нескольких гидротрансформаторов и гидромуфт, нескольких ступеней зубчатых передач и реверсивной зубчатой передачи. Системы их весьма разнообразны. При использовании нескольких гидротрансформаторов выходной вал каждого из них соединен с одной из зубчатых пар, так что при переключении трансформаторов меняется одновременно передаточное отношение зубчатой передачи. При наличии одного

трансформатора для изменения передаточного отношения используются гидромуфты, причем при пуске работает трансформатор через зубчатую передачу с максимальным передаточным отношением. При высоких скоростях движения трансформатор выключается и мощность двигателя передается через гидромуфту и зубчатую передачу с меньшим передаточным отношением. Так как к. п. д. гидромуфты выше, чем к. п. д. гидротрансформатора, к. п. д. передачи увеличивается. Однако использование мощности теплового двигателя понижается. На фиг. 26



Фиг. 26. Тяговая характеристика тепловоза мощностью 1400 л. с. с гидротрансформатором и двумя гидромуфтами.

приведены относительные характеристики норвежского опытного тепловоза мощностью 1400 л. с. с одним гидротрансформатором и двумя гидромуфтами. При скоростях ниже $v = 0,5$ работает гидротрансформатор и сила тяги автоматически изменяется в соответствии с его характеристикой. При $v > 0,5$ работает механическая передача с гидромуфтами ступеней и характеристика тепловоза подобна характеристике тепловоза с механической передачей.

За последние годы главным образом в Германии проведены большие работы по усовершенствованию гидромеханической передачи. В западногерманских поездных тепловозах V-80 с

дизелем 1000—1100 л. с. и V-200 с двумя такими же дизелями применены гидромеханические передачи трех различных типов.

Передача Voith LT 306 г состоит из трех гидротрансформаторов, которые соединены с ведомым валом через зубчатые передачи с различным передаточным отношением. Переключение с одной передачи на другую происходит путем опоражнивания одного из гидротрансформаторов и заполнения другого при снижении к. п. д. передачи до 0,77—0,78. При скоростях движения от 27 до 100% конструктивный к. п. д. передачи колеблется в пределах 0,77—0,81. Все переключения происходят автоматически в зависимости от скорости, причем операции опоражнивания и наполнения согласованы так, что переход осуществляется без существенного падения силы тяги.

Передача Майбах-Мекидро использует один гидротрансформатор и четырехступенчатую коробку передач. Гидротрансформатор постоянно заполнен жидкостью и работает при всех скоростях движения. Переключение ступеней осуществляется гидравлическим управлением, действующим автоматически в зависимости от

скорости движения и нагрузки на выдвижное турбинное колесо гидротрансформатора и кулачковые муфты ступеней передач.

Передача фирмы Крупп системы Лисхольм-Смит имеет один гидротрансформатор и две ступени зубчатой передачи. Гидротрансформатор также всегда заполнен и работает при обеих передачах. В насосе гидротрансформатора лопатки могут поворачиваться, что расширяет диапазон изменения силы тяги и позволяет сохранять высокое значение к. п. д. при изменении скорости. Поворот лопаток осуществляется автоматически так, чтобы дизель не перегружался, а передача работала с максимальным к. п. д. Холостой ход достигается лишь поворотом лопаток также без выключения или опоражнивания трансформатора.

В описанных трех системах гидромеханической передачи мощность всегда передается через гидротрансформатор и ряд зубчатых пар. К. п. д. их приблизительно одинаков и тяговые характеристики тепловозов почти совпадают. Передача Мекидро обеспечивает несколько больший диапазон изменения силы тяги и имеет к. п. д. немного выше, но значительно сложнее по конструкции.

Для уменьшения размеров гидромеханической передачи входной вал ее часто соединяется с валом дизеля карданным соединением и повышающей зубчатой передачей. В некоторых системах предусмотрено управление несколькими тепловозами с гидропередачей по системе многих единиц. Применен специальный карданный привод к двум движущим осям каждой тележки, допускающий их поворот и вертикальные перемещения при жестком закреплении гидропередачи в раме тепловоза. Достигнуто хорошее использование мощности дизеля в большом диапазоне скоростей. В последних исполнениях тепловозов обеспечена возможность длительной работы при максимальной силе тяги. Однако конструкция передачи усложнена. Между тепловым двигателем и осями имеются, кроме гидропередачи, 4—6 пар зубчатых передач. Общий к. п. д. передачи достигает в зоне рабочих скоростей 0,77—0,82 при новых шестернях. При износе последних он понижается.

В 1954 г. фирмой Крупп изготовлен для Бразилии тепловоз В—В—В с двумя дизелями, по 1000 л. с. и с двумя гидропередачами Лисхольм-Смит, описанными выше. Каждая гидропередача имеет три независимых карданных привода к трем осям тепловоза. Таким образом каждая ось имеет индивидуальный привод. Поворот и вертикальные перемещения одной оси не передаются на другие, но гидропередача является общей для трех осей. В СССР построен тепловоз мощностью 750 л. с. с гидротрансформатором и двухступенчатым редуктором,

10. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА

При электрической передаче тепловой двигатель приводит во вращение генератор, который питает тяговые электродвигатели, соединенные с движущими осями. Современный теплоэлектрический подвижной состав выполняется с индивидуальным приводом осей. Поэтому число тяговых двигателей равно числу движущих осей. В локомотивах, как правило, все оси являются движущими.

Для электрической передачи характерно полное отсутствие кинематической связи между тепловым двигателем и движущими осями. Это дает возможность размещать тепловой двигатель в подвижном составе независимо от расположения и конструкции ходовых частей. По существу, тепловой двигатель с генератором является электростанцией, питающей тяговые электродвигатели, и локомотив может рассматриваться как электровоз с собственной электростанцией.

Для электрической передачи может быть использован постоянный или переменный ток. Преимуществами постоянного тока являются: простое управление скоростью и силой тяги путем изменения возбуждения генератора и тяговых электродвигателей при сохранении неизменного режима работы теплового двигателя и применение электродвигателей с последовательным возбуждением, обладающих высокими тяговыми свойствами (в особенности в условиях теплоэлектрического подвижного состава).

Основное преимущество переменного тока заключается в возможности применения трехфазных асинхронных двигателей, которые имеют наименьший вес и стоимость и обладают наибольшей надежностью работы в сравнении с другими электродвигателями. Однако пуск и регулирование скорости этих двигателей в условиях теплоэлектрического подвижного состава связаны с некоторыми затруднениями. Применение пусковых реостатов усложняет оборудование и управление и повышает расход топлива тепловым двигателем. Переключение полюсов обмоток и каскадное соединение не обеспечивают возможности полного использования мощности теплового двигателя и приводят к ухудшению тяговых свойств. Наиболее совершенным и целесообразным является частотное управление двигателями, которое может обеспечить плавное или многоступенчатое изменение силы тяги и скорости в широких пределах. Для использования полной мощности теплового двигателя частота тока должна изменяться при неизменной угловой скорости теплового двигателя. Это требование может быть выполнено путем применения коллекторного генератора с возбудителем переменной частоты по системе М. П. Костенко или путем установки специальных преобразователей частоты. При этом генераторная группа получается более сложной и громоздкой, чем при постоянном токе. Эта причина, а также отсутствие опыта практического применения частотного управления в указанных выше условиях затрудняют использование переменного тока в передачах тепловозов и турбовозов. В судах дальнего плавания, где требование полного использования мощности при изменении скорости движения не имеет решающего значения, применяются передачи переменного тока без частотного управления. В Советском Союзе ведутся также исследовательские работы по разработке передач переменного тока с частотным управлением для тепловозов и турбовозов, и в дальнейшем можно ожидать их применения.

До настоящего времени в тепловозах и газотурбовозах используется электрическая передача только на постоянном токе.

Рассмотрим основные условия работы электрической передачи постоянного тока. Момент теплового двигателя уравнивается

моментом сопротивления генератора, который, если пренебречь магнитными и механическими потерями, равен

$$M_g = C_g \Phi_g I_g. \quad (10)$$

Сила тяги, создаваемая тяговыми двигателями,

$$F = z C_m \Phi_m I_m \kappa g, \quad (11)$$

где z — число тяговых двигателей;

C_g, C_m — постоянные генератора и двигателя;

Φ_g, Φ_m — магнитные потоки в генераторе и двигателе в $\text{вб} \cdot \text{сек}$;

I_g, I_m — токи нагрузки генератора и двигателя в а .

При этом

$$I_g = m I_m, \quad (12)$$

m — число параллельных цепей двигателей.

Изменение силы тяги связано в общем случае с изменением тока двигателей и генератора и изменением момента генератора. Основная задача переменной передачи — обеспечение изменения в широких пределах силы тяги при сохранении неизменного момента теплового двигателя — сводится к двум отдельным задачам: 1) уменьшению изменения тока генератора при заданном изменении силы тяги от F_{\max} до F_{\min} и 2) сохранению постоянного момента генератора при изменении тока от $I_{g\max}$ до $I_{g\min}$.

Первая задача решается путем последовательно-параллельного переключения двигателей и изменения их магнитного потока, вторая задача — изменением магнитного потока генератора.

Как показал А. С. Димитрадзе [6], коэффициент изменения силы тяги при постоянной мощности и при постоянном соединении двигателей равен

$$k_\mu = \frac{F_{\max}}{F_{\min}} = k_g k_m, \quad (13)$$

где

$$k_g = \frac{\Phi_{g\max}}{\Phi_{g\min}}; \quad (14)$$

$$k_m = \frac{\Phi_{m\max}}{\Phi_{m\min}}; \quad (15)$$

$F_{\max}, F_{\min}, \Phi_{g\max}, \Phi_{g\min}, \Phi_{m\max}$ и $\Phi_{m\min}$ — предельные значения силы тяги и магнитных потоков генератора и тяговых двигателей при использовании полной мощности теплового двигателя.

При заданной мощности теплового двигателя увеличение коэффициента k_g увеличивает размеры генератора, так как требует усиления изоляции, увеличения сечений участков магнитной цепи, повышения напряжения на коллекторе и т. д. Изменение магнитного потока тяговых двигателей в некоторых пределах возможно без изменения их размеров. Однако при глубоком ослаблении магнитного поля условия коммутации ухудшаются и, чтобы сохранить их,

приходится увеличивать воздушный зазор и прибегать к другим мерам, ведущим к увеличению размеров двигателя. Эти обстоятельства необходимо учитывать при проектировании электрической передачи.

Изменение магнитного потока тяговых двигателей достигается прежде всего применением последовательного возбуждения, которое обеспечивает автоматическое изменение потока в зависимости от тока. Кроме того, применяется шунтирование последовательных обмоток возбуждения двигателей, иногда добавляется независимая либо параллельная обмотка возбуждения, ток в которой целесообразно изменять в зависимости от тока нагрузки или напряжения генератора.

Применяется также и последовательно-параллельное переключение тяговых двигателей.

Если при переключении двигателей число параллельных цепей их увеличивается в 2 раза (например, при переключении с последовательного соединения четырех двигателей на последовательно-параллельное), то коэффициент изменения силы тяги $k_\mu = 2k_z k_m$ [6].

При изменении числа цепей в 1,5 раза (например, с двух цепей по три двигателя на три цепи по два двигателя) $k_\mu = 1,5k_z k_m$.

Таким образом, переключение двигателей позволяет расширить диапазон изменения силы тяги и скорости без увеличения размеров генератора или при заданном диапазоне — уменьшить размеры генератора. Однако переключение двигателей усложняет схему в большей степени, чем ослабление магнитного поля, и вызывает более резкие изменения силы тяги при переходе. Поэтому применение перехода целесообразно в тех случаях, когда требуются большие значения k_μ .

Использование больших значений силы тяги ограничивается нагреванием генератора и двигателей. Длительная сила тяги $F_{дл}$, как правило, ниже, чем максимальная сила тяги F_{max} , допускаемая по условиям сцепления. Генератор и тяговые двигатели обладают большой перегрузочной способностью. При холодном состоянии машин перед включением, в течение часа допустима сила тяги, превышающая длительную на 20—25%, а при пуске допускается двойная сила тяги.

Размеры тягового двигателя определяются главным образом «объемной» мощностью

$$P_{ом} = \frac{F_{м\,дл} v_{max}}{367} = \frac{F_{м\,дл} v_{дл}}{367} \cdot \frac{v_{max}}{v_{дл}} = P_{м\,дл} k'_\mu \text{ кВт}, \quad (16)$$

$$k'_\mu = \frac{v_{max}}{v_{дл}} = \frac{F_{дл}}{F_{min}}. \quad (17)$$

Здесь v_{max} — максимальная скорость движения в км/час;

F_{min} — сила тяги при максимальной скорости и полной мощности теплового двигателя в кг;

$F_{м\,дл}$ — длительная сила тяги одного двигателя в кг;

$v_{дл}$ — скорость, соответствующая длительной силе тяги при полной мощности теплового двигателя, в км/час.

Важным параметром электрической передачи является также степень ослабления поля тягового двигателя в сравнении с длительным режимом, т. е. коэффициент

$$k'_m = \frac{\Phi_m \partial l}{\Phi_{m \min}}.$$

Размеры генератора определяются в основном «объемной» мощностью

$$P_{ог} = U_{г \max} I_{г \partial l} = U_{г \partial l} I_{г \partial l} \frac{U_{г \max}}{U_{г \partial l}} = P_{г \partial l} k'_g, \quad (18)$$

где $U_{г \max}$ и $U_{г \partial l}$ — максимальное и длительное значение напряжения генератора в в ;

$$k'_g = \frac{U_{г \max}}{U_{г \partial l}} \approx \frac{I_{г \partial l}}{I_{г \min}} = \frac{\Phi_{г \max}}{\Phi_{г \partial l}}. \quad (19)$$

Соотношения между k_μ , k_g и k_m справедливы также и для коэффициентов k'_μ , k'_g и k'_m .

Заданным значениям веса локомотива, максимальной скорости и мощности соответствует определенная величина k_μ . Размеры и вес передачи могут быть при этом уменьшены за счет снижения длительной силы тяги и k'_μ . В результате ограничивается возможная продолжительность движения поезда при полном использовании сцепного веса. Поэтому очень важно правильно выбрать величину k'_μ с тем, чтобы (не ограничивая практически требуемых возможностей использования тяговых свойств локомотива) всемерно уменьшить вес и размеры электрической передачи. Увеличение размеров электрической передачи не только повышает ее стоимость и расход ценных материалов, но приводит к увеличению размеров механической части и всего локомотива, к повышению нагрузки на рельсы.

Быстроходные пассажирские локомотивы и дизель-поезда проходят с большой скоростью руководящие подъемы. Время движения на них относительно невелико, и поэтому может использоваться перегрузочная способность электрической передачи.

Маневровые локомотивы должны быть рассчитаны на полное использование сцепного веса при обработке тяжелых поездов. Однако маневровые локомотивы работают в прерывистом режиме, что позволяет в еще большей мере использовать перегрузочную способность электрической передачи.

Для грузовых локомотивов расчетная сила тяги на руководящем подъеме должна быть по возможности близка к силе тяги, предельной по сцеплению. Но и в этом случае было бы неправильным отказываться от использования перегрузочной способности электрической передачи и требовать, чтобы длительная сила тяги соответствовала пределу по сцеплению.

В американской печати рекомендуются [24] по данным практики следующие значения коэффициента тяги при длительном режиме

(отношение длительной силы тяги к сцепному весу) для тепловозов :

Назначение	Маневровый	Быстроходный пассажирский	Средний пассажирский	Грузовой	Передачный
Коэффициент длительной тяги	0,13—0,15	0,11—0,12	0,15—0,16	0,14—0,18	0,2—0,22

При увеличении мощности на единицу веса локомотива (или, что то же самое, при уменьшении удельного веса) коэффициент изменения силы тяги k_μ (как следует из фиг. 21) уменьшается вследствие увеличения минимальной скорости и некоторого снижения максимальной силы тяги. Вместе с тем, вследствие увеличения скорости время движения на руководящем подъеме уменьшается, что расширяет возможность использования перегрузочной способности тяговых двигателей и генератора. По этим причинам с уменьшением удельного веса локомотива должно уменьшаться отношение максимальной скорости к длительной (если максимальная скорость задана условиями движения), что, в свою очередь, позволяет уменьшить удельный вес электрической передачи.

Равенства (17) и (19) выведены в предположении, что полная мощность теплового двигателя используется до максимальной скорости v_{\max} , для чего напряжение генератора увеличивается с уменьшением тока до $U_{g \max}$ при постоянной мощности. Если напряжение генератора, начиная с некоторого значения, растет медленнее, то использование полной мощности прекращается при скорости движения $v'_{\max} < v_{\max}$. Максимальная скорость v_{\max} и в этом случае может быть получена по характеристике тягового двигателя за счет уменьшения тока и силы тяги, но уже при пониженной мощности. Уменьшение максимального напряжения генератора позволяет сократить его размеры, но понижает использование мощности теплового двигателя на высоких скоростях.

Такое решение приемлемо для маневровых локомотивов, для которых использование мощности при высоких скоростях не имеет решающего значения. Допустимо также некоторое ограничение использования мощности двигателя на высоких скоростях для грузовых локомотивов с большим отношением максимальной скорости к длительной (например, более четырех-пяти), так как в этом случае поезд, вес которого выбирается по силе тяги на руководящем подъеме, сможет двигаться со скоростью, близкой к v_{\max} , лишь на спусках.

Изменение магнитного потока генератора осуществляется автоматически подбором системы возбуждения генератора и возбудителя и специальными регулирующими устройствами. При этом возможно такое регулирование генератора, при котором автоматически поддерживается любой заранее заданный режим теплового двигателя.

При работе на полной мощности поддерживается неизменный режим работы теплового двигателя. При работе на пониженной мощности момент теплового двигателя может изменяться по кривой наибольшей экономичности или любой другой кривой, желательной для теплового двигателя или по другим соображениям. Воздействуя на возбуждение генератора или его возбудителя, можно сохранять ток при пуске приблизительно постоянным до достижения полной мощности теплового двигателя.

Изменение напряжения генератора обеспечивает также возможность плавного или многоступенчатого изменения силы тяги при пуске и во время движения. При электрической передаче возможно получение большой силы тяги при малом напряжении генератора, следовательно при малом потреблении мощности.

Устойчивость работы силовой установки обеспечивается выбором параметров электрооборудования без затруднений.

Электрическая передача позволяет осуществить электрическое торможение, использование которого на спусках повышает безопасность движения и уменьшает износ бандажей колес и тормозных колодок. В США почти все поездные тепловозы изготавливаются с электрическим торможением и на многих тепловозах, не имевших его, добавляется тормозное электрооборудование в эксплуатации. В газотурбовозах возможно также торможение на газотурбинную установку, что приведет к снижению расхода топлива.

Таковы принципиальные преимущества электрической передачи. К ним следует добавить также использование генератора для пуска теплового двигателя и более совершенную защиту теплового двигателя от опасных режимов воздействием на электрическую передачу.

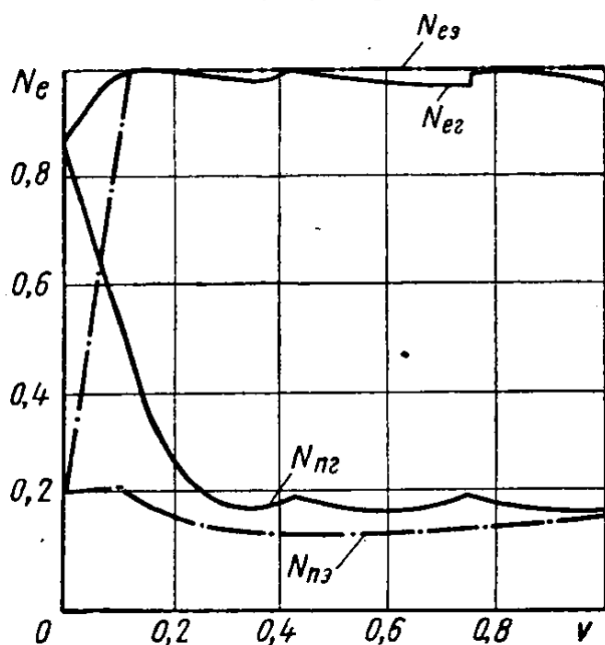
Главными недостатками электрической передачи являются ее большие размеры, вес и стоимость, а также значительный расход меди.

К. п. д. электрической передачи зависит от мощности. При мощности теплового двигателя менее 300 л. с. он составляет при номинальном режиме 0,80—0,84, при больших мощностях достигает 0,84—0,87. При отклонении режима работы от номинального к. п. д. несколько изменяется, увеличиваясь при уменьшении тока до $I_2 = (0,6—0,7) I_{\text{дл}}$ и уменьшаясь при увеличении тока. Однако эти отклонения в пределах рабочих режимов невелики. При мощности теплового двигателя более 1000 л. с. такие отклонения не превышают 2—3%, при мощности 300—1000 л. с. — 3—6%.

11. СРАВНЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПЕРЕДАЧ

В Советском Союзе все поездные тепловозы мощностью от 300 до 2000 л. с. в одной секции выполнены с электрической передачей (кроме тепловоза Э^{мх} 3, эксплуатация которого прекращена свыше 15 лет назад). Применение механической передачи ограничивается лишь автомотриссами и мотовозами малой мощности. Гидравлическая передача практически не эксплуатировалась. Отсутствие опыта эксплуатации затрудняет сравнение передач.

Рассмотрим прежде всего, в какой степени различные передачи отвечают сформулированным выше требованиям.



Фиг. 27. Зависимость мощности дизеля N_e и потерь в передаче N_n от скорости движения при гидромеханической передаче Voith и электрической передаче.

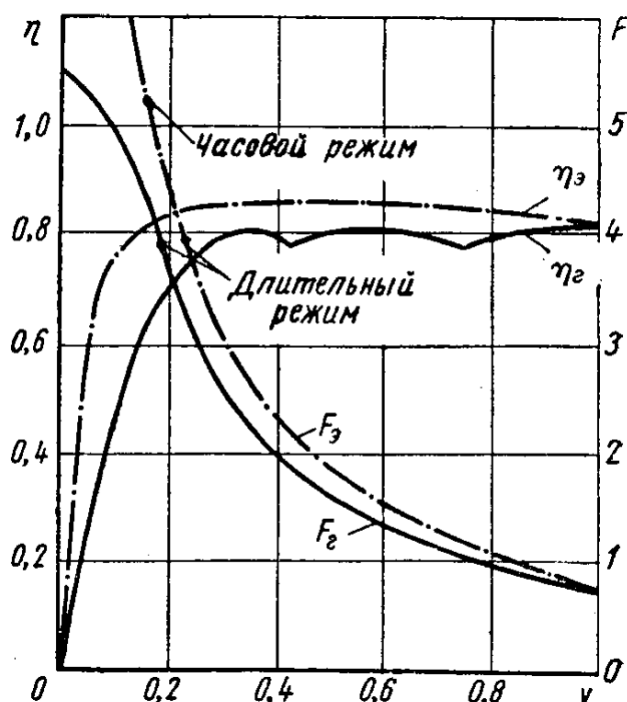
Наибольшее использование мощности теплового двигателя достигается при электрической передаче. В современных зарубежных тепловозах и газотурбовозах с электрической передачей полная мощность используется в пределах от максимальной силы тяги до максимальной скорости движения.

Современные гидropередачи также обеспечивают высокое использование мощности теплового двигателя, но все же уступают в этом электрической передаче. На фиг. 27 приведены кривые мощности теплового двигателя в зависимости от скорости движения для тепловозов мощностью 2000 л. с. с электрической передачей (Э) и с гидropередачей Voith с тремя трансформаторами (Г) [28]. Кривые

мощности дизеля N_e при гидropередаче несколько ниже, чем при электрической, но разница невелика. Однако полезная мощность при гидравлической передаче ниже вследствие увеличения потерь N_n . На фиг. 27 приведены для обеих передач кривые зависимости N_n от скорости. Разница в потерях особенно велика при малых скоростях, так как максимальная сила тяги при электрической передаче может быть получена при малой мощности теплового двигателя, тогда как при гидравлической передаче почти полная мощность двигателя обращается в потери.

На фиг. 28 приведены кривые к. п. д. электрической и гидравлической передач. К. п. д. гидравлической передачи на 4—6% ниже, чем электрической, и в большей степени меняется при изменении скорости.

При механической передаче двигатель может работать в номинальном режиме лишь при некоторой определенной скорости движения для каждой ступени. Степень использования мощности при



Фиг. 28. Зависимость силы тяги F и к. п. д. передачи η тепловозов с гидромеханической передачей Voith и электрической передач.

других скоростях зависит от характеристики самого двигателя, а не от передачи. При нормальных характеристиках дизеля и одно-вального газотурбинного двигателя и механической передаче удовлетворительное использование мощности не может быть получено. При двухвальном газотурбинном двигателе, быстроходных карбюраторных двигателях, газовых турбинах с механическим генератором газов, мощность которых в некотором диапазоне угловых скоростей изменяется мало, возможно удовлетворительное использование мощности при механической передаче, но все же и в этом случае она значительно уступает гидромеханической и в особенности электрической передаче.

К. п. д. механической и гидравлической передачи относительно мало зависит от величины мощности, на которую они рассчитаны, тогда как к. п. д. электрической передачи при увеличении мощности существенно повышается. Поэтому при малых мощностях теплового двигателя (менее 200—300 л. с.) электрическая передача уступает по к. п. д. механической передаче и сближается с гидравлической и гидромеханической. При больших мощностях она превосходит гидравлическую и гидромеханическую и мало отличается от механической. Следует отметить, что с износом зубчатых колес к. п. д. гидромеханической и механической передач существенно понижается, тогда как к. п. д. электрической передачи почти не зависит от времени работы.

По размерам и весу гидравлическая и механическая передачи мало отличаются между собой. Электрическая передача имеет значительно большие размеры и вес при малых мощностях, при увеличении передаваемой мощности разница снижается. Разница в весе передач зависит также от требуемого диапазона изменения силы тяги и скорости (коэффициента k_u). При электрической передаче изменение диапазона может быть достигнуто в некоторых пределах изменением магнитного потока двигателей и переключением их при небольшом повышении веса передачи. Увеличение k_u при механической и гидромеханической передаче требует большего числа ступеней передачи, что существенно повышает размеры при той же мощности. Размеры и вес всех передач возрастают при заданной мощности по мере увеличения требуемой силы тяги. Однако последнее в большей степени влияет на размеры и сложность конструкции механической и гидромеханической передачи, чем электрической. Все же даже с учетом этих соображений электрическая передача на сегодня уступает механической и гидромеханической передаче по весу, размерами, по первоначальной стоимости, но это компенсируется более длительным сроком службы ее в связи с износом зубчатых колес, которые в большом количестве имеются в механической и гидромеханической передачах. Наименьшую стоимость имеет механическая передача, в особенности при малых мощностях.

По стоимости эксплуатации нет достоверных данных, так как тепловозы с различными передачами не эксплуатировались в одинаковых условиях. В литературе встречаются по этому вопросу противоречивые данные. Имеются, однако, сведения по параллельной

эксплуатации дизель-поездов SV TO6 (Германия) с двумя дизелями по 600 л. с. с электрической и гидромеханической передачей [28]. Дизель-электрические поезда обеспечили среднегодовую полезную мощность выше на 37% и эксплуатационные расходы ниже на 10% в сравнении с дизель-гидравлическими, несмотря на то, что первые весят на 9 т больше. Поскольку условия работы в дизель-поездах для гидропередачи являются наиболее благоприятными (вследствие малых сил тяги и малого диапазона ее изменения), следует ожидать для магистральных локомотивов еще большего снижения эксплуатационных расходов при электрической передаче.

По статистическим данным в США расходы на ремонт электрооборудования тепловозов, включая и вспомогательное электрооборудование, не относящееся к электропередаче, составляют 13—17% стоимости ремонта тепловозов.

Электрическая передача показала высокую надежность работы в различных эксплуатационных и климатических условиях. В США за 1954 г. зарегистрировано во всех тепловозах (число которых превышало 20 тыс.) 813 неисправностей в тяговых двигателях и генераторах, тогда как число неисправностей в дизелях составило 4848 (всего в локомотивах 19 640).

Гидропередача до сего времени эксплуатировалась главным образом в странах с мягким климатом. Ее работоспособность в условиях большого диапазона изменения температуры окружающей среды недостаточно проверена. Изменение вязкости рабочей жидкости может существенно влиять на экономичность, работоспособность передачи, надежность уплотнений и т. д. Опасность замерзания рабочей жидкости усложняет обслуживание и понижает надежность работы.

Исходя из характеристик и особенностей работы различных видов передачи, можно сделать следующие выводы об областях их применения.

Механическая передача используется главным образом при тепловых двигателях, допускающих работу по внешней характеристике в значительном диапазоне чисел оборотов, крутящий момент которых по внешней характеристике существенно уменьшается с увеличением числа оборотов. Для экономичности работы двигателя при механической передаче важно, чтобы снижение числа оборотов при работе на внешней характеристике не сопровождалось значительным повышением удельного расхода топлива. Механическая передача нецелесообразна для поездных тепловозов в связи с недостаточным использованием мощности теплового двигателя и потерей силы тяги при переключении скоростей.

Диапазон изменения силы тяги и скорости может быть получен широким, но за счет увеличения числа ступеней и усложнения передачи. Преимущественной областью применения механической передачи являются мотовозы и автомотриссы малой мощности.

Для экономичной работы теплового двигателя при гидродинамической передаче, наоборот, необходимо, чтобы удельный расход топлива не возрастал резко при снижении крутящего момента.

Это в особенности важно для локомотивов, часто работающих при пониженной мощности (маневровых, промышленных). Максимальный крутящий момент теплового двигателя используется лишь при максимальной угловой скорости и быстро падает с ее понижением вследствие снижения момента сопротивления гидронасоса. Поэтому гидродинамическая передача в большей степени пригодна при двигателях, для которых наиболее благоприятным режимом работы является работа при больших угловых скоростях, и рассчитанных на узкий диапазон рабочих угловых скоростей. Экономическая работа передачи возможна лишь в узком диапазоне силы тяги и скорости движения, поэтому ее применение может оказаться целесообразным лишь в автомотриссах и дизель-поездах, предназначенных для равнинной местности.

Выполнение гидротрансформатора с поворотными лопатками позволяет в некоторых пределах изменять характеристики, но это связано с усложнением конструкции и управления.

Свойства гидромеханической передачи зависят от ее схемы и применяемых элементов. Если движение поезда большей частью осуществляется при передаче через гидромуфты, то по условиям работы двигателя передача близка к механической и к двигателю должны быть предъявлены такие же требования, как при механической передаче. Если передача мощности осуществляется лишь гидротрансформаторами, то она аналогична гидродинамической передаче. Как и при механической передаче, возможно выполнение локомотива с широким диапазоном изменения силы тяги и скорости, однако при этом также требуется увеличение числа ступеней и усложняется передача. Передача с гидротрансформаторами обеспечивает лучшее использование мощности, более стабильный режим работы теплового двигателя, более плавный переход с одной ступени на другую, чем передача с гидромуфтами. Гидромеханическая передача может оказаться наиболее целесообразной для автомотрисс, дизель-поездов и быстроходных пассажирских локомотивов с быстроходными дизелями малой и средней мощности.

Электрическая передача является наиболее универсальной. Характеристика ее приспособлена к различным характеристикам тепловых двигателей и может обеспечить изменение силы тяги и скорости в любом заданном диапазоне при полном использовании мощности теплового двигателя и экономичной работе его.

Электрическая передача может быть применена для тепловых двигателей любой мощности: для поездных и маневровых тепловозов и газотурбовозов, в особенности предназначенных для ведения и обработки поездов большого веса. Только в случае электрической передачи возможна работа теплового двигателя по кривой наибольшей экономичности при пониженной мощности и пуск поезда с приблизительно постоянной силой тяги, а также электрическое торможение.

Эти выводы подтверждаются также практикой зарубежных стран. В табл. 3 приведены величины мощностей, указанные железными дорогами различных стран [23]. Преимущественные области

Преимущественные области применения передач

Страна	Мощность в л. с.		
	механическая	гидравлическая	электрическая
Швеция	<100	100—800	>800
Дания	<400	100—400	>400
Нидерланды	—	—	>100
Западная Германия	—	Все	—
Бельгия	<300	300—750	>750
Люксембург	<200	200—750	>750
Франция	<150	150—500	>500
Австрия	—	<800	>500
Португалия	<200	—	>200
Тунис	<300	—	>200
Французские колонии в Африке	<300	300—700	>300

применения передач по мощности находятся в пределах: механическая — менее 300 л. с.; гидравлическая — 100—800 л. с.; электрическая — более 200 л. с.

Французские железнодорожники считают, что по надежности эксплуатации, простоте управления и удобству управления первое место занимает электрическая передача и последнее — механическая; по весу и стоимости — наоборот. Австрийские железнодорожники указывают, что преимущества гидропередачи несомненны для автомотрисс, но в тепловозах с числом осей более двух она сложнее электрической; бельгийцы отмечают трудности для гидропередачи при давлении оси на рельс более 15 т [23].

Западногерманские железнодорожники считают во всех случаях гидропередачу более целесообразной. Это в известной мере объясняется тем, что Западная Германия испытывает затруднения с медью и гидропередачи составляют важную статью экспорта [28], так как большинство стран, использующих гидропередачу, либо приобретают ее в Западной Германии, либо изготавливают по лицензии западногерманских фирм. Существенное значение имеет тот факт, что в Западной Германии, как и в большинстве европейских стран, в железнодорожном транспорте преобладает пассажирское движение и веса поездов невелики. По данным за 1954 г. грузовые перевозки в Западной Германии составляют 31% всех перевозок и средний вес поезда нетто равен 262 т [8].

В США, где преобладает грузовое движение с поездами большого веса, для поездных тепловозов и газотурбовозов применяется исключительно электрическая передача.

В Советском Союзе основными перевозками являются грузовые и поэтому вес поездов непрерывно возрастает; для поездных локомотивов электрическую передачу следует считать наиболее целесообразной. Для маневровых локомотивов большой мощности, предназначенных для переработки тяжелых поездов на крупных

станциях, электрическая передача также более целесообразна, поскольку она обеспечивает наиболее широкий диапазон изменения силы тяги и скорости, имеет большую перегрузочную способность, более экономичную работу при пониженной мощности и лучшую маневренность локомотива. В остальных случаях целесообразность той или иной передачи должна проверяться параллельным проектированием и в некоторых случаях параллельной эксплуатацией локомотивов с различными передачами. Такая проверка должна производиться, в частности, для маневровых тепловозов средней мощности (300—800 л. с.) и для быстроходных пассажирских локомотивов, в особенности с двухвальными газовыми турбинами.

12. ПУТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ

Основным недостатком электрической передачи, как указывалось выше, являются большие размеры и вес. Поэтому главная задача заключается в уменьшении размеров. За последние годы в этом направлении достигнуты значительные успехи за рубежом и в Советском Союзе.

Одним из средств уменьшения веса электрооборудования является повышение скорости вращения машин. Генератор, как правило, соединяется с дизелем без промежуточной передачи и повышение его скорости связано с увеличением скорости вращения вала дизеля. У дизелей отечественных тепловозов $n = 740 \div 850$ об/мин. За рубежом наряду с подобными же дизелями применяются для тепловозов дизели с $n = 1000$ об/мин (США) и $n = 1500$ об/мин (Англия, Германия). Применение быстроходных дизелей ограничено из-за того, что они обычно менее долговечны и дороже в эксплуатации. Однако повышение угловой скорости дизеля уменьшает его размеры, что позволяет увеличить мощность тепловоза. Увеличение мощности дизель-генератора при сохранении веса тепловоза почти не требует увеличения веса электрической передачи, так как сила тяги при этом мало изменяется, а диапазон ее изменения уменьшается. Если увеличение мощности достигается повышением быстроходности, то вес передачи может даже уменьшиться. Большой срок службы локомотивов весьма важен, в особенности поездных. Однако «моральный» износ их вследствие интенсивного развития техники тепловозостроения делает нецелесообразным требование срока службы более 10—12 лет. Поэтому важно найти целесообразное сочетание разумного срока службы с повышением быстроходности дизеля.

В газотурбовозах быстроходность генератора ограничивается лишь его конструкцией. Поэтому следует выполнять его с максимальной допустимой угловой скоростью.

Повышение быстроходности тяговых двигателей, а также генераторов в газотурбовозах зависит от применяемых материалов и улучшения конструкции и технологии производства. Использование материалов более высокого качества, чем в существующем электрооборудовании (специальных сталей и сплавов, электротехнической стали с пониженными потерями, специальных электрощеток, крем-

нийорганических и других теплостойких изоляционных материалов), позволяет не только повысить быстроходность, но и уменьшить размеры машин за счет увеличения механических, тепловых и электрических нагрузок. Уменьшение веса двигателей может быть достигнуто применением независимой подвески их (опорно-рамных двигателей). Не исчерпаны в существующих машинах возможности улучшения вентиляции. Успехи в этой области определяются основными материалами для машин и работой предприятий электротяговой промышленности. По техническому проекту электропередачи газотурбовоза, разработанному ХЭТЗ, удельный вес генератора и тяговых электродвигателей на единицу мощности снижен почти вдвое в сравнении с машинами тепловоза ТЭЗ.

Большое значение для повышения эффективности электрической передачи и локомотива в целом имеет усовершенствование схемы передачи и характеристик элементов электрооборудования. Только применение системы автоматического регулирования мощности повысило использование мощности дизеля в тепловозе ТЭЗ на 10—12%, что равносильно такому же повышению мощности дизеля и электропередачи при сохранении их размеров и веса. Повышение использования мощности теплового двигателя и сцепного веса локомотива, уменьшение расхода топлива могут быть достигнуты автоматическим регулированием пускового тока, улучшением характеристик генератора, возбuditеля, тяговых электродвигателей и регулирующих устройств. Характерным для этих задач является то, что их решение не связано с заметным увеличением размеров и веса электропередачи или с большими затратами средств, но оно требует проведения научно-исследовательских работ в лабораториях и на локомотивах. Ряд научных организаций Советского Союза ведет исследования в этом направлении.

ГЛАВА IV

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ПРИ САМОРЕГУЛИРОВАНИИ

13. ПРЕДЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕНЕРАТОРА

Мощность генератора определяется равенством

$$P_g = 0,736 \eta_g (N_e - N_{scn}) = U_g I_g 10^{-3} \text{ квт}, \quad (20)$$

где N_{scn} — мощность вспомогательных устройств, получающих энергию от теплового двигателя, в л. с.;

η_g — к. п. д. генератора;

U_g — напряжение генератора в в;

I_g — ток нагрузки генератора в а.

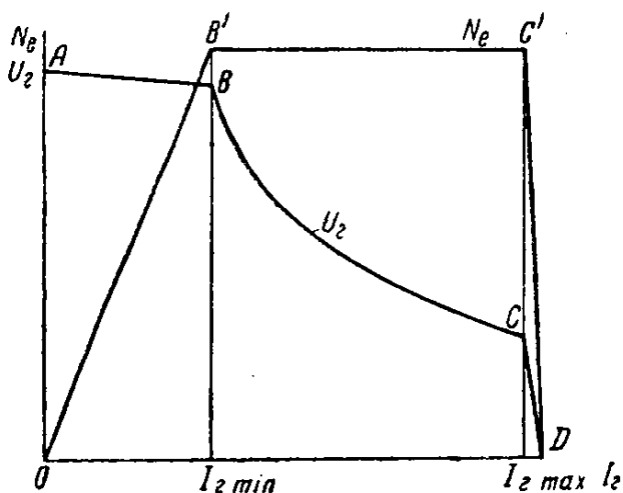
Ток нагрузки генератора зависит от режима работы тяговых электродвигателей и изменяется при изменении режима движения поезда. С целью полного использования мощности теплового двигателя желательно, чтобы при каждом значении тока нагрузки напряжение генератора соответствовало величине, определяемой равенством (20) при наибольшей мощности теплового двигателя.

Мощность вспомогательного оборудования (вентиляторы холодильника теплового двигателя и тяговых электродвигателей, компрессор, насосы воды, масла и топлива) и к. п. д. генератора изменяются с изменением I_g относительно мало. Следовательно, при постоянной мощности теплового двигателя N_e мощность генератора тоже должна оставаться приблизительно постоянной, т. е. $P_g = U_g I_g \approx \text{const}$.

Однако напряжение и ток генератора не могут изменяться бесконечно. Для каждого генератора существует максимальное значение напряжения, которое не может быть превышено по насыщению магнитной цепи, по условиям нагревания обмотки возбуждения или по прочности изоляции, а также по допускаемому напряжению между коллекторными пластинами. Максимальный ток может ограничиваться по условиям искрения под щетками на коллекторе или по условиям нагревания обмоток главной цепи.

При правильном выборе параметров генератора указанные выше ограничения должны приблизительно соответствовать значе-

ниям тока и напряжения, требуемым для обеспечения максимальной силы тяги по сцеплению и максимальной скорости движения (кроме условия нагревания, которое часто ограничивает во времени возможность использования силы тяги по сцеплению). Предельная внешняя характеристика генератора изображена кривой $ABCD$ на фиг. 29. Участок AB характеризует ограничение по напряжению, участок BC — ограничение по мощности теплового двигателя и участок CD — ограничение по току. С уменьшением тока предельное значение напряжения, ограничиваемое по коммутации, нагреванию обмотки возбуждения или магнитному насыщению, несколько увеличивается.



Фиг. 29. Предельная внешняя характеристика генератора тепловоза и зависимость мощности N_e теплового двигателя от тока генератора по предельной характеристике.

Поэтому в общем случае участок AB представляет наклонную линию. С уменьшением напряжения допустимый ток может быть несколько повышен как по нагреванию (вследствие уменьшения нагревающих магнитных потерь), так и по сцеплению (вследствие уменьшения скорости движения). Поэтому в общем случае участок CD также может быть изображен наклонным. Для простоты участки AB и CD изображены прямыми, хотя в зависимости от характера ограничения они могут быть криволинейными. Кривая $OB'C'D$, изображающая зависимость мощности N_e теплового двигателя от

тока нагрузки генератора, построена в соответствии с характеристикой $ABCD$ генератора. Как видно из кривой, наличие ограничений не позволяет использовать полную мощность теплового двигателя во всем диапазоне возможных нагрузок генератора. Полная мощность используется при нагрузках от $I_{g \min}$ до $I_{g \max}$, при остальных нагрузках мощность теплового двигателя должна быть уменьшена.

В системе управления транспортной машины нужно предусмотреть получение характеристики генератора, показанной на фиг. 29, так как только при этом может быть полностью использована силовая установка. Изменение напряжения с целью обеспечения этой характеристики в дальнейшем называется регулированием двигатель-генератора. В системе управления должна быть также предусмотрена возможность уменьшения напряжения генератора, а следовательно, и мощности теплового двигателя в тех случаях, когда предельный режим не требуется, например, при разгоне поезда или при движении с ограниченной скоростью. Изменение напряжения и мощности от нуля до предельной характеристики называется управлением двигатель-генератором. Регулирование двигатель-генератора может быть выполнено автоматическим, т. е. дей-

ствующим независимо от водителя, управляющего машиной, и неавтоматическим, т. е. осуществляться самым водителем. Управление двигатель-генератором выполняется неавтоматическим, поскольку водитель должен иметь возможность выбрать режим, соответствующий условиям движения.

Получение характеристик, приведенных на фиг. 29, нельзя обеспечить посредством регулирования только теплового двигателя или только генератора. Как указывалось выше, регулирование теплового двигателя осуществляется изменением подачи топлива, регулирование генератора — изменением магнитного потока полюсов. По характеристике $OB'C'D$ при токах нагрузки меньше $I_{g\min}$ мощность теплового двигателя растет с увеличением тока, а напряжение генератора сохраняется почти постоянным. Следовательно, на этом участке характеристики подача топлива должна изменяться, а магнитный поток и угловая скорость генератора могут оставаться приблизительно постоянными. При нагрузках от $I_{g\min}$ до $I_{g\max}$ мощность теплового двигателя постоянна, а напряжение генератора изменяется. Поэтому подача топлива и угловая скорость двигателя должны оставаться неизменными, а магнитный поток генератора изменяется. Наконец, при $I_g > I_{g\max}$ должны изменяться и подача топлива и магнитный поток. Таким образом, в общем случае существуют три зоны работы двигатель-генератора. В зоне от $I_g = 0$ до $I_{g\min}$ нужно регулировать тепловой двигатель, а генератор можно не регулировать; от $I_{g\min}$ до $I_{g\max}$ генератор должен регулироваться при сохранении неизменного режима двигателя и при $I_g > I_{g\max}$ нужно регулировать одновременно и тепловой двигатель и генератор. Описанная выше схема работы двигатель-генератора является теоретической. В выполненных транспортных машинах часто допускается с целью упрощения оборудования и системы регулирования отклонение характеристики генератора от желательной. Однако приближение действительной схемы работы двигатель-генератора к теоретической повышает степень использования установленного оборудования и тяговые свойства локомотива и, следовательно, является критерием качества системы регулирования.

Таким образом, система регулирования двигатель-генератора включает в себя регулирование теплового двигателя и регулирование генератора.

Для дизеля и газовой турбины, для которых главным образом применяется электрическая передача, всегда предусматриваются регуляторы угловой скорости; тем самым обеспечивается автоматическое регулирование теплового двигателя в зоне нагрузок от $I_g = 0$ до $I_{g\min}$ и при $I_g > I_{g\max}$. В зоне нагрузок от $I_{g\min}$ до $I_{g\max}$ регулятор теплового двигателя должен занимать положение максимальной подачи топлива.

Регулирование генератора должно осуществляться для разных нагрузок по различным законам. Наиболее важным является регулирование в зоне нагрузок от $I_{g\min}$ до $I_{g\max}$, охватывающей основные рабочие режимы движения поезда. Здесь регулирование должно поддерживать постоянную мощность теплового двигателя. В зоне

от $I_z = 0$ до $I_{z\min}$ естественная характеристика генератора часто оказывается близкой к желательной и в большинстве случаев специальное регулирование не требуется. Регулирование при $I_z > I_{z\max}$ осуществляют как для защиты генератора, так и для получения благоприятных пусковых характеристик.

Применение автоматического регулирования генератора может обеспечить наивыгоднейший режим теплового двигателя, не зависящий от профиля пути в большом диапазоне нагрузок; повышает степень использования установленной мощности оборудования и сцепного веса; уменьшает число рукояток управления и тем самым упрощает управление машиной; устраняет необходимость постоянного наблюдения за приборами. При автоматическом регулировании генератора уменьшается возможность ненормальных режимов теплового двигателя и электрооборудования из-за ошибки или неопытности водителя, и вследствие этого повышается надежность работы оборудования.

Стоимость оборудования при автоматическом регулировании несколько повышается, так как автоматическое регулирование достигается за счет усложнения конструкции электрических машин, добавления специальных регулирующих машин или аппаратов. Однако при надлежащем выборе системы автоматического регулирования и оборудования дополнительные затраты, обычно очень небольшие, вполне оправдываются. Поэтому во всех современных теплоэлектрических транспортных машинах, начиная от автобуса и кончая мощными тепловозами и турбовозами, применяется автоматическое регулирование генератора.

Как уже указывалось, главной целью автоматического регулирования генератора является поддержание постоянной мощности теплового двигателя, т. е. реализация желательной характеристики (фиг. 29) в зоне нагрузок от $I_{z\min}$ до $I_{z\max}$.

14. ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Известны многочисленные системы автоматического регулирования генераторов переменного и постоянного тока, имеющие целью либо поддержание постоянного напряжения, мощности, частоты тока, либо изменение напряжения по определенному закону (сварочные генераторы, генераторы в системе генератор—двигатель). В системах автоматического регулирования генератора в теплоэлектрическом подвижном составе имеется много общего с указанными системами и в них могут быть использованы некоторые одинаковые элементы оборудования. Однако для того, чтобы правильно выбрать и построить систему регулирования тепловоза или турбовоза, необходимо отчетливо представлять ее отличия от перечисленных выше систем. Для последних характерно прежде всего то, что автоматическое регулирование создает определенный режим, необходимый по условиям работы потребителей энергии.

Электростанции обязаны снабжать потребителей током постоянной частоты и напряжения, система генератор—двигатель обеспечи-

вает определенные скоростные и нагрузочные характеристики механизмов, приводимых от этой системы (прокатных станов и т. п.), сварочные генераторы должны иметь заданную характеристику, требуемую по условиям сварки и т. д. Работа большинства подобных систем автоматического регулирования генератора практически не зависит от режима работы двигателя, приводящего генератор во вращение. Приводной двигатель выбирается так, чтобы он мог развивать крутящий момент, необходимый для привода генератора во всем диапазоне нагрузок последнего, и по возможности сохранять при этом постоянную угловую скорость. Изменение режима работы приводного двигателя оказывает лишь незначительное влияние на процесс автоматического регулирования генератора. Поэтому при изучении работы этих систем угловая скорость генератора, как правило, принимается постоянной.

Основная цель регулирования двигатель-генератора в подвижном составе заключается в создании определенного режима именно для приводного двигателя, а не для потребителей энергии — тяговых электродвигателей. Желательная характеристика генератора в рабочей зоне нагрузок строится исходя из сохранения постоянной мощности теплового двигателя: регулирование генератора является по существу регулированием нагрузки теплового двигателя.

При каждом нарушении равновесия моментов двигателя и генератора изменяется угловая скорость вала двигатель-генератора. Это отклонение угловой скорости должно быть устранено в результате действия системы автоматического регулирования. Отсюда следует, что при изучении процесса автоматического регулирования необходимо учитывать изменение угловой скорости. Во многих системах регулирования, применяемых в транспортных машинах, изменение угловой скорости является одним из основных факторов регулирования.

Особенностью регулирования генератора в транспортных машинах является также то, что оно не охватывает всего диапазона изменения тока нагрузки, а действует только при $I_z > I_{z\min}$ (фиг. 29). Работа системы регулирования генератора зависит и от того, какой регулятор установлен на тепловом двигателе: многорежимный или двухрежимный.

Таким образом, работа генератора и работа теплового двигателя в транспортных машинах при автоматическом регулировании очень тесно связаны между собой, поэтому вопросы регулирования генератора и теплового двигателя должны рассматриваться совместно.

Применяемые системы автоматического регулирования двигатель-генератора по принципу действия можно разделить на две основные группы. К одной группе относятся системы, в которых регулирование двигатель-генератора достигается такими характеристиками генератора $M_z = f(n, I_z)$, при которых изменение тока нагрузки не вызывает существенных изменений режима теплового двигателя. Эти характеристики могут быть получены применением комбинации различных обмоток возбуждения генератора или его возбuditеля, использованием специальных конструкций возбuditеля. В этих

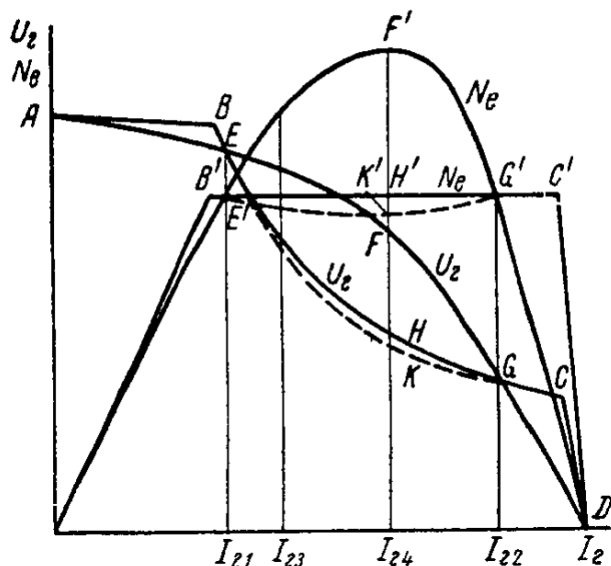
случаях автоматическое регулирование двигатель-генератора осуществляется без применения специальных регуляторов возбуждения и может быть названо саморегулированием двигатель-генератора.

Ко второй группе относятся замкнутые системы автоматического регулирования с различными регуляторами возбуждения генератора.

15. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Использование полной мощности при саморегулировании может быть обеспечено, если внешняя характеристика генератора без применения регуляторов совпадает с желательной характеристикой (фиг. 29). Практически не удается достигнуть такого совпадения характеристик, и генератор можно выполнить с характери-

стикой, лишь более или менее приближающейся к желательной. Пусть кривая $ABCD$ (фиг. 30) изображает желательную характеристику и кривая $AEFGD$ — действительную характеристику генератора при номинальной угловой скорости n_n . В точках E и G кривые пересекаются. Следовательно, при нагрузках I_{e1} и I_{e2} , соответствующих точкам E и G , режим теплового двигателя является заданным, т. е. используется полная мощность теплового двигателя.



Фиг. 30. Внешние характеристики генератора при работе с дизелем.

При токах $I_e < I_{e1}$ и $I_e > I_{e2}$ напряжение генератора ниже, чем по желательной характеристике. Поэтому генератор при этих

нагрузках потребляет меньшую мощность и регулятор теплового двигателя уменьшит подачу топлива при сохранении постоянной угловой скорости. При нагрузках $I_{e1} < I_e < I_{e2}$ напряжение и мощность генератора выше, чем по желательной характеристике. Мощность N_e двигателя по желательной характеристике изображена кривой $O'BC'D$, по внешней характеристике генератора — кривой $OE'F'G'D$.

Если перемещение штока регулятора не ограничено упором, регулятор увеличит подачу топлива и двигатель будет работать с перегрузкой при $n = n_n$ во всем диапазоне от I_{e1} до I_{e2} (кривая $OE'F'G'D$). Для предотвращения перегрузки необходимо установить упор для штока регулятора в положении, соответствующем полной подаче топлива, т. е. внешней характеристике теплового двигателя M_∂ (фиг. 31). Точка E'' (фиг. 31) соответствует точке E' (фиг. 30) и через нее, следовательно, проходит кривая момента сопротивления M_e генератора при токе I_{e1} .

Если ток нагрузки увеличится с I_{e1} до некоторого значения I_{e3} , то момент сопротивления генератора при неизменной скорости

вращения увеличится и кривая момента поднимется. Двигатель при этом перегружается и угловая скорость его будет уменьшаться. Если момент генератора будет при этом также уменьшаться (как показано на фиг. 31), то при некоторой пониженной угловой скорости n_3 восстановится равенство моментов двигателя и генератора и генератор будет работать в новом установившемся режиме.

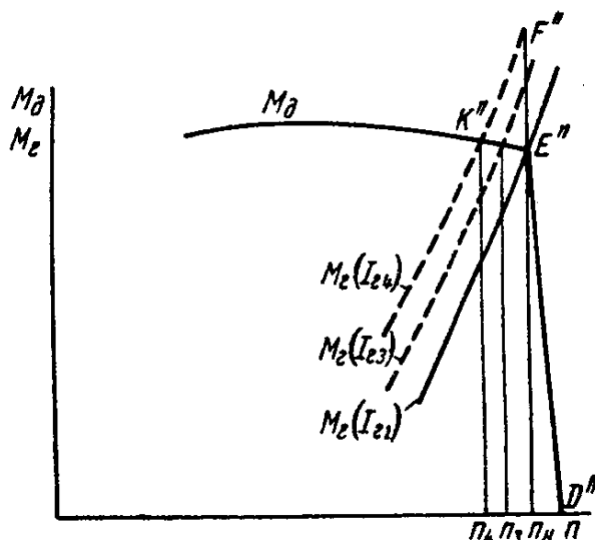
При постоянной угловой скорости n_n момент генератора пропорционален мощности. Следовательно, момент генератора достигает максимального значения (точка F'' , фиг. 31) при токе I_{24} , соответствующем максимальной мощности (точка F' , фиг. 30). Установившийся режим для тока I_{24} при совместной работе двигателя и генератора характеризуется точкой K'' (фиг. 31). Угловая скорость имеет при этом минимальное значение n_4 . Следовательно, при I_{24} мощность N_e является также минимальной и соответствует некоторой точке K' (фиг. 30).

Таким образом саморегулирование двигатель-генератора возможно в том случае, если момент сопротивления, создаваемый генератором, находится в определенной зависимости от угловой скорости. Если кривая $F''K''$ (фиг. 31) не пересекается с внешней характеристикой теплового двигателя, совместная работа двигателя и генератора без регулятора возбуждения невозможна.

Если характеристика генератора при номинальной угловой скорости не совпадает с желательной характеристикой, полная мощность используется лишь в точках пересечения характеристик E и G (фиг. 30).

При всех остальных режимах мощность снижается и соответствует кривой $E'K'G'$, а напряжение генератора — кривой EKG . При нагрузках, для которых характеристика генератора ниже желательной, потребляемая генератором мощность определяется его характеристикой при номинальной угловой скорости n_n , и регулятор дизеля уменьшает подачу топлива в соответствии с этой мощностью. Для нагрузок, при которых напряжение генератора при n_n выше, чем по предельной характеристике, снижение мощности определяется падением угловой скорости, которое зависит от ряда факторов. Для того чтобы достигнуть наилучшего использования теплового двигателя, очевидно, необходимо добиваться, чтобы отклонение угловой скорости в этих режимах было минимальным.

Для уменьшения падения угловой скорости $\Delta n = n_n - n_4$ имеются (как следует из фиг. 31) два пути: 1) увеличение крутизны характеристики момента сопротивления генератора $M_e = f(n)$ и 2) уменьшение изменения момента генератора при изменении тока нагрузки (т. е. уменьшение отрезка $F''E''$), что означает в конечном счете



Фиг. 31. К определению режимов совместной работы дизеля с генератором, имеющим характеристику по фиг. 30.

максимальное приближение внешней характеристики генератора к предельной.

При постоянном токе нагрузки кривые зависимости $M_2 = f(n)$ и $\Phi_2 = f(n)$ отличаются только масштабом, а в относительных единицах они одинаковы. Поэтому для повышения использования мощности теплового двигателя нужно, чтобы магнитный поток генератора возможно более резко увеличивался с увеличением угловой скорости. При установившемся режиме работы крутящий момент теплового двигателя равен моменту сопротивления генератора. Поэтому кривая $M_2 = f(n)$ или $\Phi_2 = f(n)$ определяет собой зависимость реализуемого момента теплового двигателя от угловой скорости.

Необходимо стремиться к тому, чтобы зависимость $\Phi_2 = f(n)$ обеспечивала работу теплового двигателя с наибольшей экономичностью и наименьшим износом.

Второй путь повышения использования мощности теплового двигателя — сохранение постоянного момента генератора при изменении его нагрузки. Из равенства (10) следует, что это возможно (если пренебречь потерями) при $\Phi_2 I_2 = \text{const}$, т. е. при гиперболической зависимости магнитного потока от тока нагрузки $\Phi_2 = f(I_2)$.

Заметим, что внешняя $U_2 = f(I_2)$ и внутренняя $E_2 = f(I_2)$ характеристики генератора строятся для постоянной угловой скорости и, следовательно, внутренняя характеристика отличается от зависимости $\Phi_2 = f(I_2)$ только масштабом, а внешняя, кроме того, на величину внутреннего падения напряжения в генераторе. Следовательно, второй путь заключается в приближении кривой $\Phi_2 = f(I_2)$ или внешней характеристики генератора к гиперболе.

По характеру зависимости $\Phi_2 = f(I_2)$ или $U_2 = f(I_2)$ различают системы саморегулирования с выпуклыми и с гиперболическими характеристиками генератора.

В обоих случаях система возбуждения должна обеспечивать необходимую зависимость магнитного потока от угловой скорости.

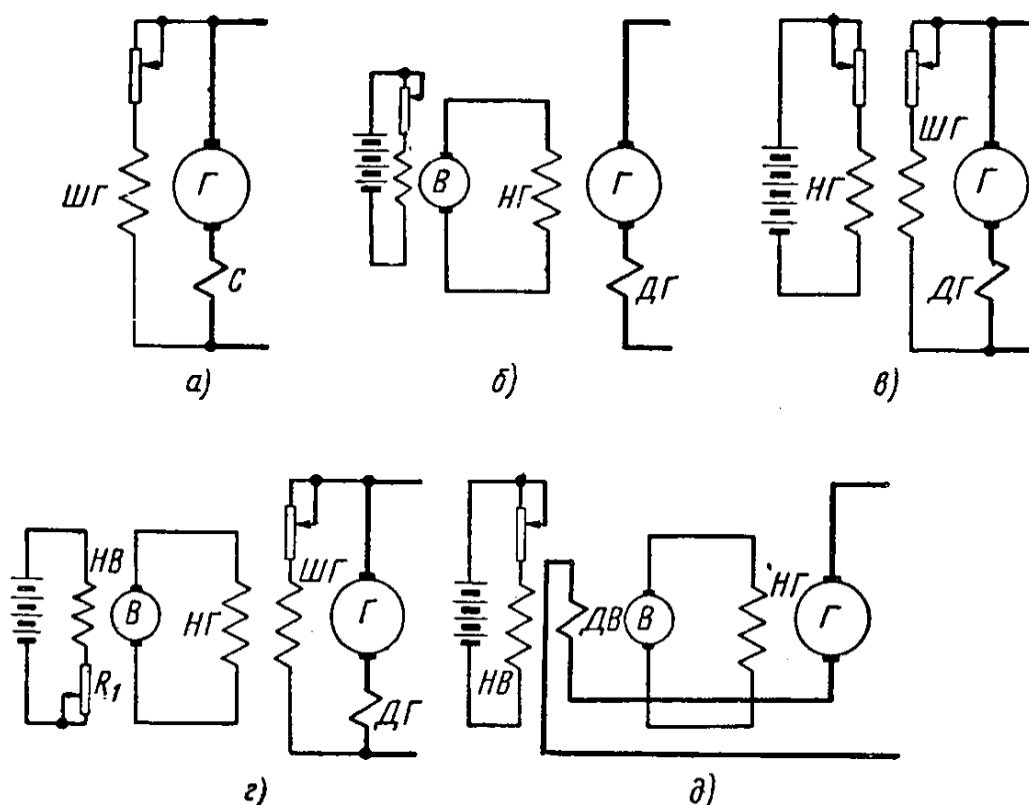
16. САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ ПРИ ВЫПУКЛЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ГЕНЕРАТОРА

Генераторы с выпуклыми характеристиками часто применяются в экскаваторах, сварочных агрегатах и т. д. Однако в этих случаях, как правило, они работают при постоянной угловой скорости и характер зависимости $\Phi_2 = f(n)$ не имеет существенного значения. Некоторые из применяемых для этой цели систем возбуждения используются и в теплоэлектрическом подвижном составе, но параметры обмоток изменяются так, чтобы обеспечить желательную зависимость $\Phi_2 = f(n)$.

На фиг. 32 изображены принципиальные схемы возбуждения генераторов, применяемых в теплоэлектрическом подвижном составе. Как показывают экспериментальные исследования и расчеты, все эти схемы обеспечивают возможность получения характеристик $\Phi_2 = f(I_2)$, приведенных на фиг. 33.

Форма характеристики зависит главным образом от насыщения магнитной цепи генератора и возбuditеля. При ненасыщенной

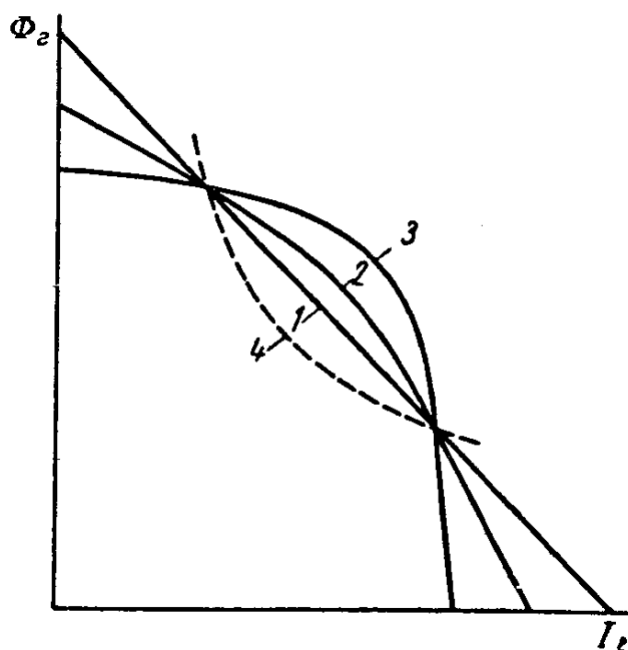
магнитной цепи характеристики близки к прямой 1, при сильном насыщении — к кривой 3. Форма кривой зависит также от соотно-



Фиг. 32. Схемы возбуждения, обеспечивающие выпуклые характеристики генератора Г:

а — генератор с самовозбуждением; б — противоконпаундный генератор с возбудителем В; в — трехобмоточный генератор с постоянным независимым возбуждением; г — трехобмоточный генератор с возбудителем; д — генератор с противоконпаундным возбудителем. НГ — обмотка независимого возбуждения; ШГ — параллельная обмотка; С — последовательная согласно включенная обмотка; ДГ — последовательная встречно включенная обмотка генератора; НВ — независимая обмотка возбудителя.

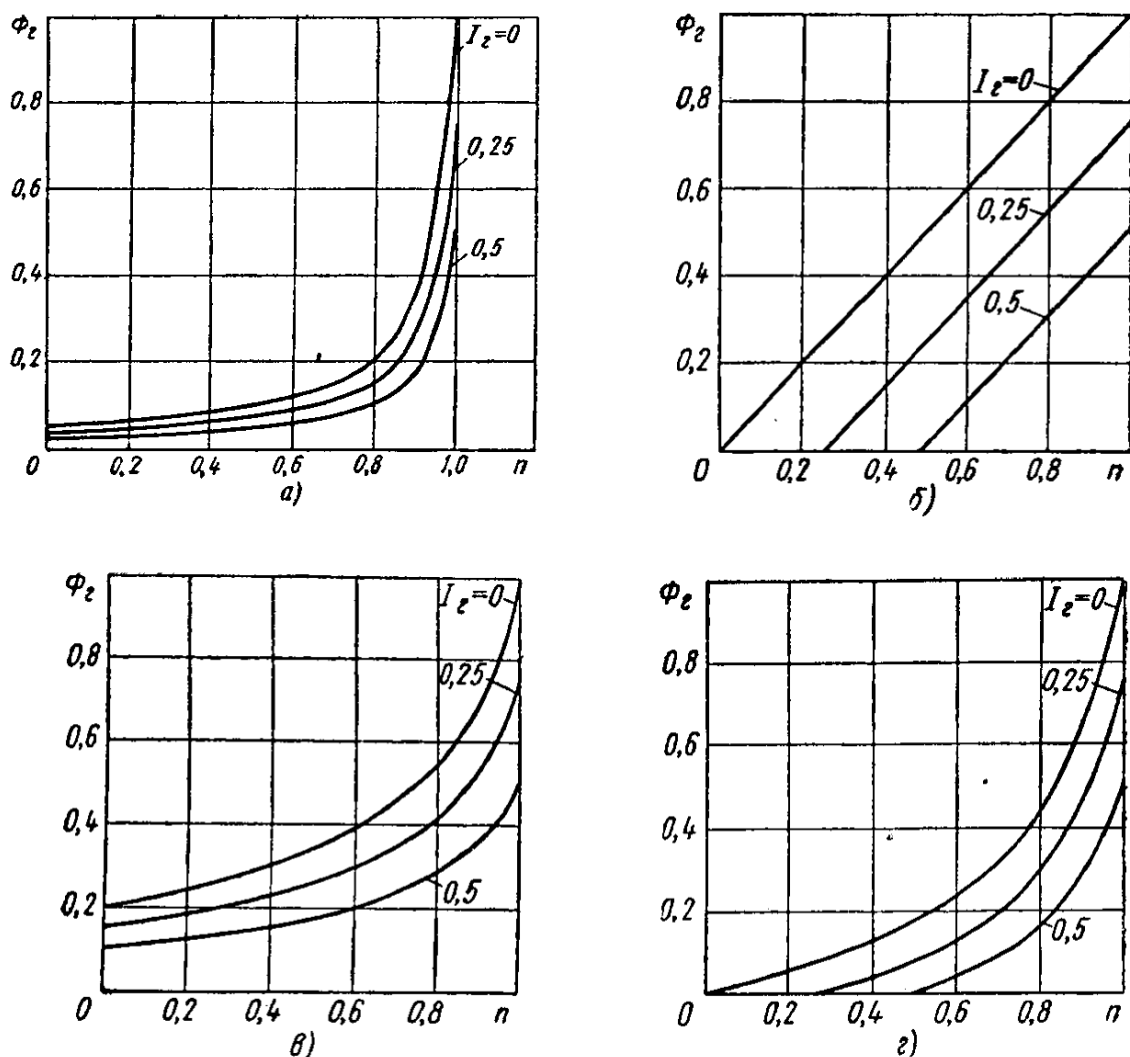
шения параметров обмоток возбуждения и влияния реакции якоря. Для каждой из схем (фиг. 32) возможно получение характеристик, подобных кривым 1, 2 или 3 (фиг. 33). Кривая 1 меньше других отличается от кривой 4, соответствующей постоянному моменту теплового двигателя, и при прочих равных условиях обеспечивает меньшее падение угловой скорости, но для этого требуется слабое насыщение магнитной цепи генератора и, следовательно, увеличенные размеры его. Кривая 3 может быть получена при нормальном насыщении магнитной цепи генератора, обеспечивает лучшие характеристики силы тяги при пуске



Фиг. 33. Зависимость магнитного потока от тока нагрузки при номинальной угловой скорости для схем, показанных на фиг. 32.

поезда (пусковой ток, а следовательно и пусковая сила тяги сохраняются почти постоянными), ограничивает величину максимального напряжения генератора, но использование мощности при средних нагрузках значительно снижается.

Характеристики $\Phi_z = f(n)$ также зависят от насыщения магнитной цепи и параметров обмоток возбуждения, но они существенно различны для разных схем. На фиг. 34 представлены расчетные



Фиг. 34. Зависимость магнитного потока генератора от угловой скорости при различных токах нагрузки для схем а—г (фиг. 32) при ненасыщенной магнитной цепи.

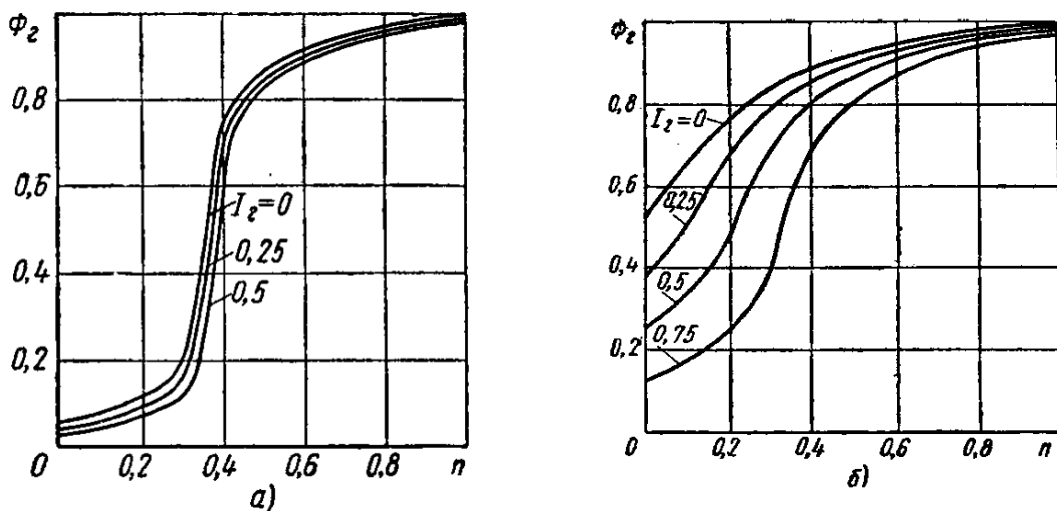
характеристики для схем а—г (фиг. 32) при ненасыщенной магнитной цепи генератора, а на фиг. 35 — характеристики для схем а и б (фиг. 32) при сильно насыщенной магнитной цепи генератора при различных токах нагрузки.

Параметры обмоток подобраны для случая ненасыщенной магнитной цепи так, что при номинальной угловой скорости $n = 1$ зависимость $\Phi_z = f(I_z)$ является прямой, проходящей через точки $(\Phi_z = 1, I_z = 0)$ и $(\Phi_z = 0, I_z = 1)$ для всех схем. Для схемы фиг. 32, а принят остаточный магнитный поток $\Phi_{z0} = 0.05$.

Как видно из сопоставления кривых (фиг. 34), от выбора схемы существенно зависит крутизна характеристик $\Phi_z = f(n)$, особенно

в зоне скоростей, близких к номинальной, и диапазон рабочих скоростей, при которых схема обеспечивает работу теплового двигателя в режиме, близком к номинальному. Например, при токе $I_2 = 0,5$ изменение магнитного потока от 0,1 до 0,5 и пропорциональное ему изменение крутящего момента теплового двигателя (в 5 раз) происходит при изменении угловой скорости от 0,8 до 1,0 при генераторе с самовозбуждением и от 0 до 1,0 при трехобмоточном генераторе с постоянным независимым возбуждением.

Насыщение магнитной цепи резко уменьшает крутизну характеристик (как видно из фиг. 35) главным образом в зоне высоких скоростей, где наиболее важна большая крутизна для повышения использования мощности теплового двигателя. При этом уменьшается различие между характеристиками, полученными для различных схем. На фиг. 35 приведены характеристики тех схем, которые при ненасыщенной магнитной цепи более всего отличаются по крутизне. Вследствие того, что при насыщенной магнитной цепи изменение намагничивающей силы обмоток возбуждения мало изменяет магнитный поток, спадание магнитного потока мало для обеих схем в зоне насыщения.



Фиг. 35. Зависимость магнитного потока генератора от угловой скорости при различных токах нагрузки для схем а и б (фиг. 32) при сильно насыщенной магнитной цепи.

Из сравнения кривых фиг. 34 и 35 с кривыми наибольшей экономичности тепловых двигателей (фиг. 6, 12 и 15) следует, что путем выбора схемы возбуждения, параметров обмоток и степени насыщения магнитной цепи можно выполнить электрическую передачу, обеспечивающую работу теплового двигателя вблизи режимов наибольшей экономичности.

Таким образом, выбор системы возбуждения, параметров обмоток и степени насыщения магнитной цепи генератора существенно влияет на использование мощности теплового двигателя, диапазон рабочих скоростей его при нагрузке, экономичность работы, на пусковые характеристики, а также на размеры генератора. Удовлетворительное использование мощности может быть достигнуто

только при слабом насыщении магнитной цепи генератора, что приводит к увеличенным размерам его. Выполнение генератора с несколькими обмотками возбуждения, в особенности с встречно направленными, также связано с некоторым увеличением его размеров.

В зависимости от назначения и характера эксплуатации подвижного состава меняется относительное значение каждого из перечисленных выше факторов. Например, для городских автобусов, работающих с частыми пусками, пусковая характеристика и использование мощности при пуске может иметь большее значение, чем использование мощности при больших скоростях движения. Для поездных локомотивов наибольшее значение имеет использование мощности в широком диапазоне скоростей. В маневровых локомотивах важным фактором является экономичность работы при пониженной мощности.

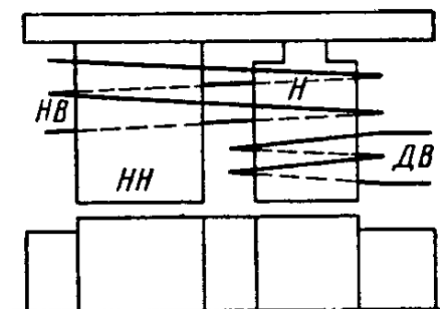
Для городского автобуса характеристика 3 (фиг. 33) более желательна, чем кривые 1 и 2, так как при увеличении максимального тока до величины, допустимой по коммутации, она обеспечивает большее среднее ускорение; но использование мощности при средних нагрузках при такой характеристике меньше, чем по кривым 1 и 2. Так как обычно при пуске автобуса водитель сразу устанавливает максимальную подачу топлива, экономичность работы дизеля на пониженной мощности не имеет существенного значения. Следовательно, возможно применение генератора с круто возрастающей характеристикой $M_d = f(n)$ [или $\Phi_s = f(n)$]. Генератор с самовозбуждением, имеющий такую характеристику, является к тому же наиболее простым конструктивным решением, поэтому его применение в городских автобусах обоснованно.

Наоборот, для маневрового тепловоза эта система не рациональна, так как из-за чрезмерной крутизны характеристик $\Phi_s = f(n)$ и $M_d = f(n)$ повышается расход топлива при пониженной мощности, а также повышается износ двигателя вследствие работы при высоких угловых скоростях. Более целесообразным в этом случае является трехобмоточный генератор, который предоставляет больше возможностей для изменения крутизны характеристики $M_d = f(n)$ и позволяет изменять в более широких пределах пусковое усилие за счет изменения тока в обмотке независимого возбуждения.

17. САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ ПРИ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ГЕНЕРАТОРА

Для получения гиперболической формы внешней характеристики генератора используются возбудители с расщепленными полюсами. В Советском Союзе эксплуатируются три различных конструкции возбудителей такого рода: четырехполюсный возбудитель тепловозов ТЭ1 и ТЭ2 и шестиполюсные возбудители тепловоза ДБ и тепловоза ТЭЗ. Устройство, схема включения и принцип действия этих возбудителей подробно описаны в литературе [11], [17], [22].

Рассмотрим кратко принцип их действия на примере тепловоза ТЭ2. Устройство возбuditеля показано на фиг. 36, упрощенная принципиальная схема тепловоза — на фиг. 37. Обмотка НВ охватывает ненасыщенный НН и насыщенный Н (с магнитным мостиком) полюсы возбuditеля и питается через сопротивление R_1 от вспомогательного генератора ВГ и через сопротивление R_2 — от якоря возбuditеля. Дифференциальная обмотка ДВ охватывает только насыщенные полюса и обтекается током генератора. Э. д. с. возбuditеля создается суммой двух магнитных потоков, из которых поток ненасыщенных полюсов сохраняется приблизительно постоянным. Поток насыщенных полюсов, определяемый разностью намагничивающих сил обмоток НВ и ДВ, уменьшается с увеличением тока нагрузки до нуля и затем меняет знак, увеличиваясь в противоположном направлении. Путем подбора намагничивающих сил обмоток и формы магнитной характеристики насыщенных полюсов можно получить внешнюю характеристику генератора, близкую к кривой постоянной мощности в некотором диапазоне изменения тока нагрузки.



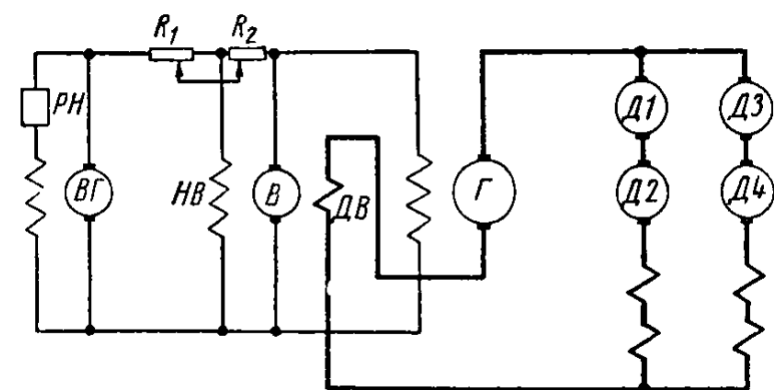
Фиг. 36. Схема устройства возбuditеля с расщепленными полюсами:

НН — ненасыщенный полюс; Н — насыщенный полюс; НВ — обмотка независимого возбуждения; ДВ — дифференциальная обмотка.

Возбuditель тепловозов Д^В и ТЭЗ отличается тем, что имеет по окружности якоря шесть полюсов, из которых четыре выполняются ненасыщенными и имеют одну обмотку независимого возбуждения и два — насы-

щенными с параллельной и дифференциальной обмотками.

Рассмотрим характеристики возбuditелей и создаваемые ими характеристики генераторов. На фиг. 38—40 приведены опытные характеристики возбuditелей и генераторов, снятые ЦНИИ МПС совместно с МЭИ при испытаниях тепловозов ТЭ2, Д^В и ТЭЗ* на



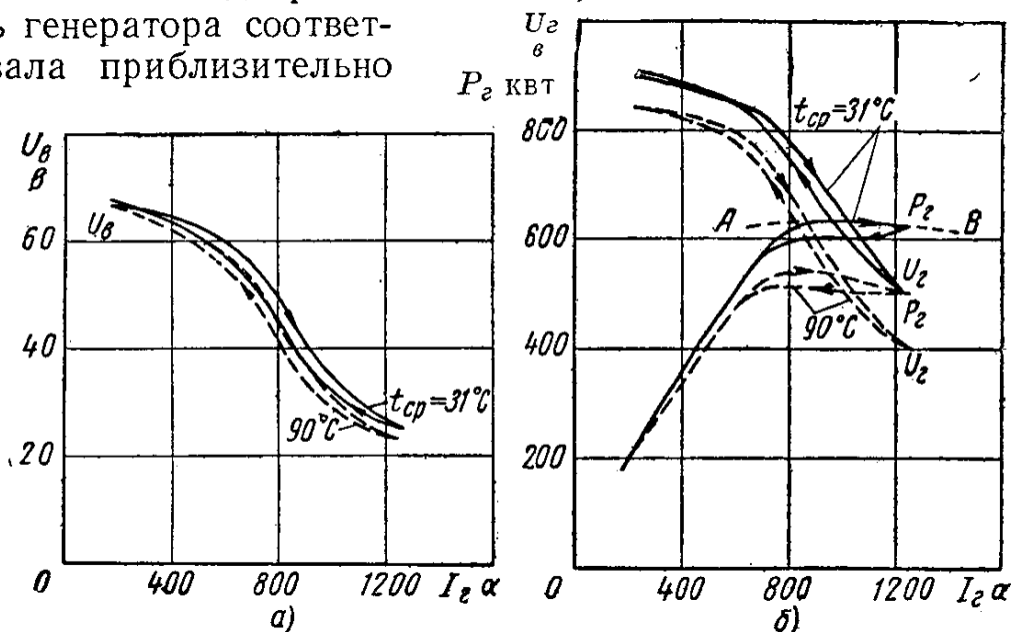
Фиг. 37. Упрощенная принципиальная схема секции тепловоза ТЭ2:

В — возбuditель; ВГ — вспомогательный генератор; Г — главный генератор; Д1—Д4 — тяговые двигатели; РН — регулятор напряжения; ДВ и НВ — обмотки возбуждения возбuditеля.

экспериментальном кольце ЦНИИ. Характеристики снимались при нагрузке дизель-генератора на реостат сначала при увеличении тока, затем — при уменьшении. На последних положениях контроллера, соответствующих номинальной мощности дизеля, характерис-

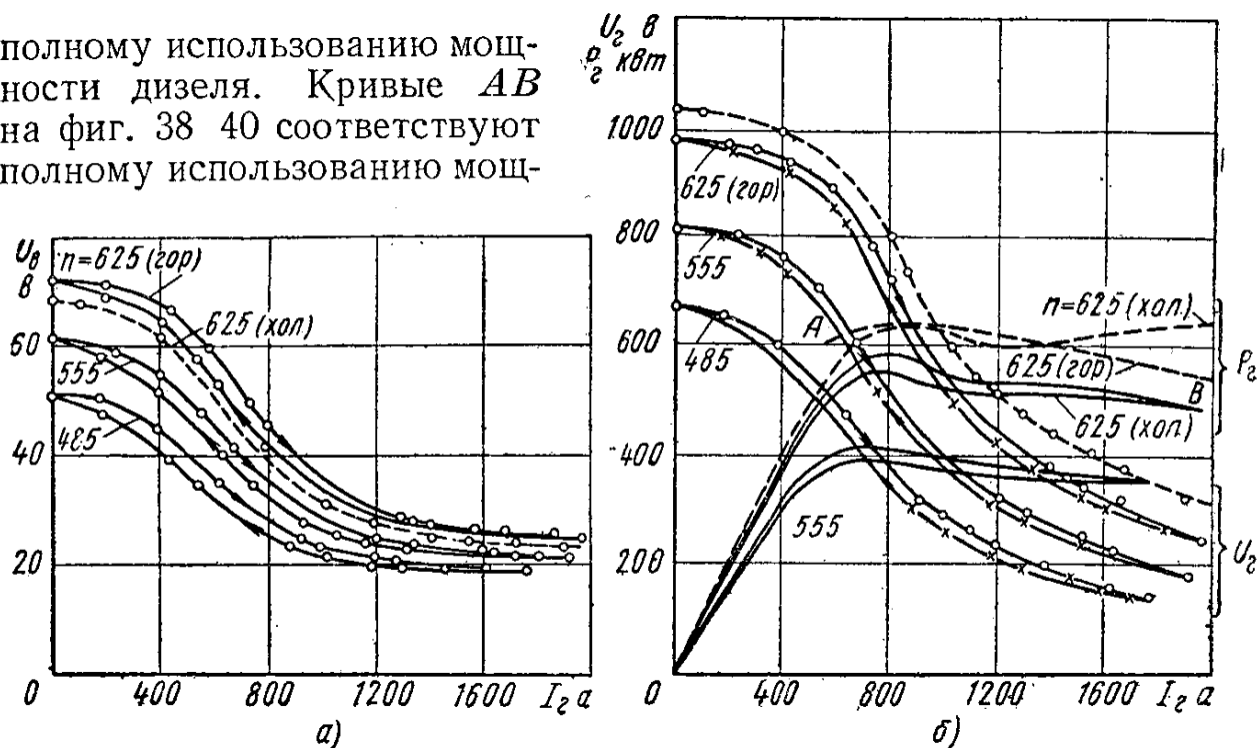
* Характеристики тепловозов Д^В и ТЭЗ снимались при отключенных узлах дополнительного регулирования, т. е. регулирование генераторов осуществлялось только возбuditелями с расщепленными полюсами.

тики снимались при холодных и нагретых обмотках возбуждения генератора и возбудителя. Во всех случаях характеристики возбудителей были подобраны таким образом, чтобы наибольшая мощность генератора соответствовала приблизительно



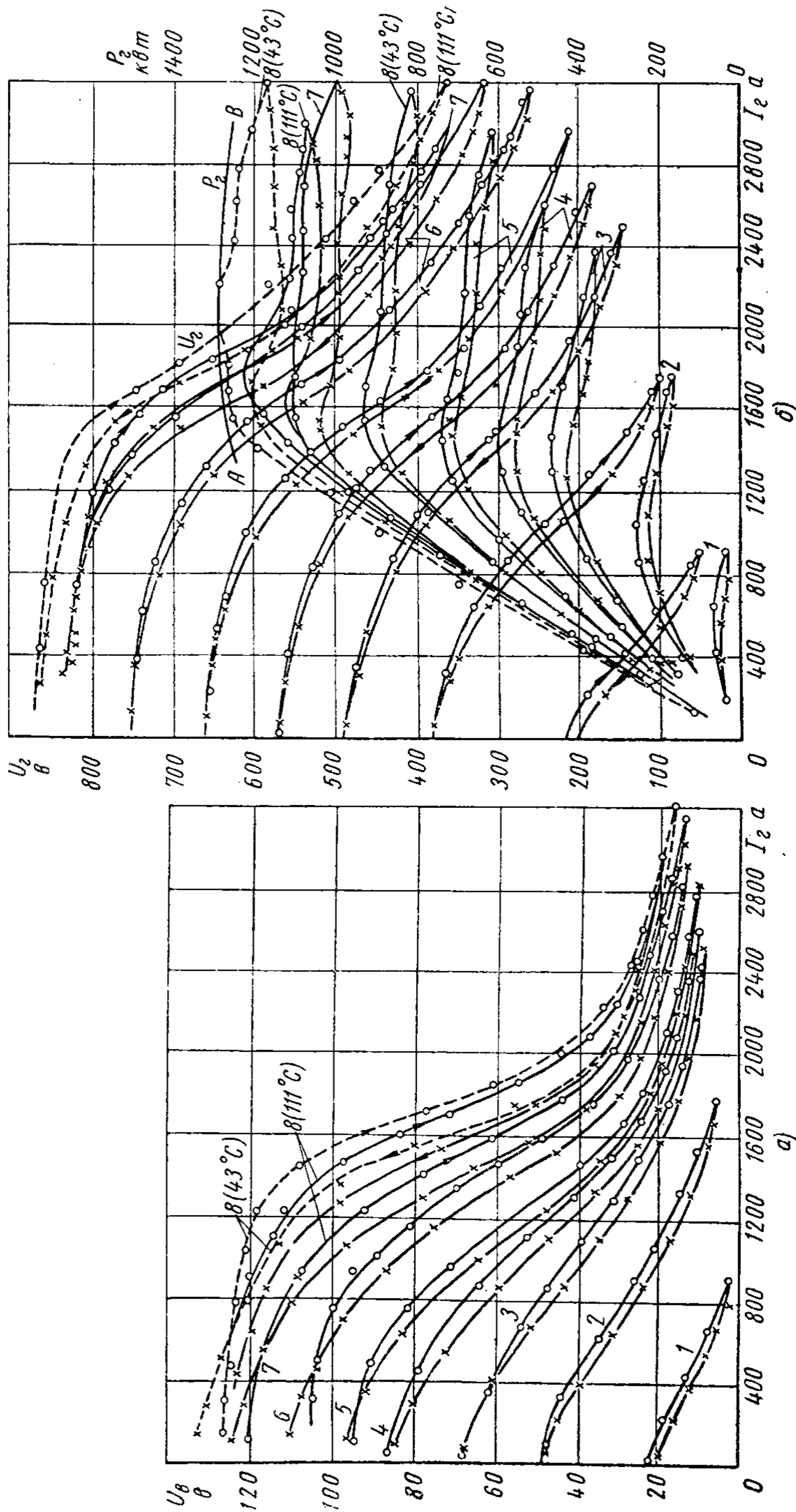
Фиг. 38. Зависимость напряжения U_e возбудителя (а), напряжения U_2 и мощности P_2 генератора (б) тепловоза ТЭ2 от тока генератора при различных температурах обмотки возбуждения генератора.

полному использованию мощности дизеля. Кривые АВ на фиг. 38 40 соответствуют полному использованию мощ-



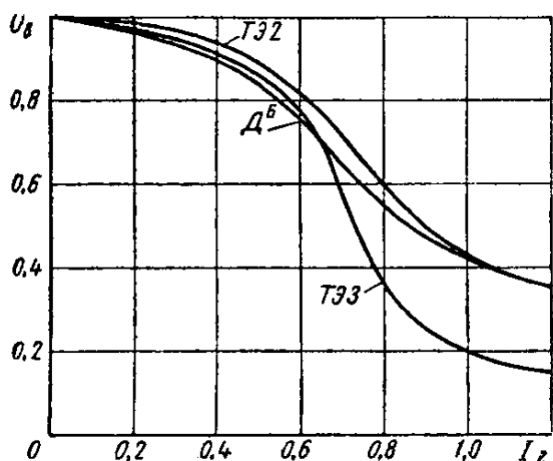
Фиг. 39. Зависимость напряжения U_e возбудителя (а), напряжения U_2 и мощности P_2 генератора (б) тепловоза ДБ от тока генератора при различных угловых скоростях и при различных температурах обмотки возбуждения генератора (для $n = 625$ об/мин).

ности дизеля при всех рабочих токах (мощность генератора при этом несколько изменяется вследствие изменения потерь в нем). Подача топлива при испытаниях не ограничивалась (упор был снят).



Фиг. 40. Зависимость напряжения U_g возбуждителя (а), напряжения U_g и мощности P_g генератора (б) тепловоза ТЭЗ от тока генератора при различных угловых скоростях и различных температурах обмоток возбуждения (для $n = 850$ об/мин).

Мощность генератора по мере увеличения тока вначале увеличивается и затем сохраняется приблизительно постоянной до максимального тока. Внешняя характеристика генератора близка по форме к характеристике возбудителя, несколько отклоняясь от нее при малых токах нагрузки (вследствие насыщения магнитной цепи генератора).



Фиг. 41. Относительные характеристики возбудителей тепловозов ТЭ2, ДБ и ТЭЗ.

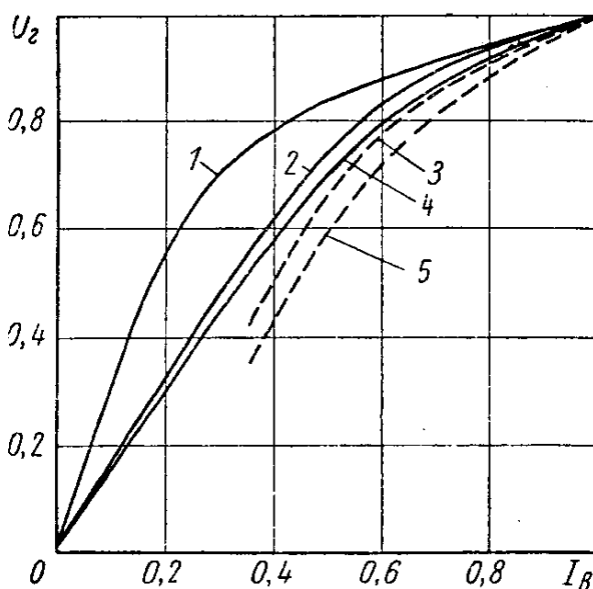
Наибольшие отклонения от кривой постоянной мощности имеет по форме характеристики генератор тепловоза ТЭЗ, наименьшие — генератор тепловоза ТЭ2.

На фиг. 41 приведены характеристики возбудителей, построенные по средним точкам опытных кривых в относительных единицах, причем напряжение отнесено к максимальному значению, а ток — к длительному режиму. Характеристика возбудителя тепловоза ТЭЗ отличается от остальных большей крутизной при средних нагрузках и большим диапазоном изменения напряжения возбудителя, вследствие чего потребовалось увеличить длину прямолинейной части магнитной характеристики насыщенных полюсов.

Сопоставление магнитных характеристик генераторов, приведенных на фиг. 42 и отнесенных к режиму максимального напряжения, объясняет причины этой разницы. Генератор ТЭЗ имеет значительно более насыщенную магнитную цепь, чем остальные генераторы, и поэтому для одинакового относительного диапазона изменения напряжения требует большего изменения тока возбуждения и напряжения возбудителя. При нагрузке генератора размагничиваю-

Вместе с тем характеристики генераторов имеют существенные отклонения от кривой АВ постоянной мощности дизеля. Отклонения вызываются в основном тремя причинами:

- 1) отклонением формы внешней характеристики вследствие несовершенства характеристики возбудителя;
- 2) влиянием гистерезиса магнитных цепей генератора и возбудителя и
- 3) изменением температуры обмоток возбуждения генератора и возбудителя.

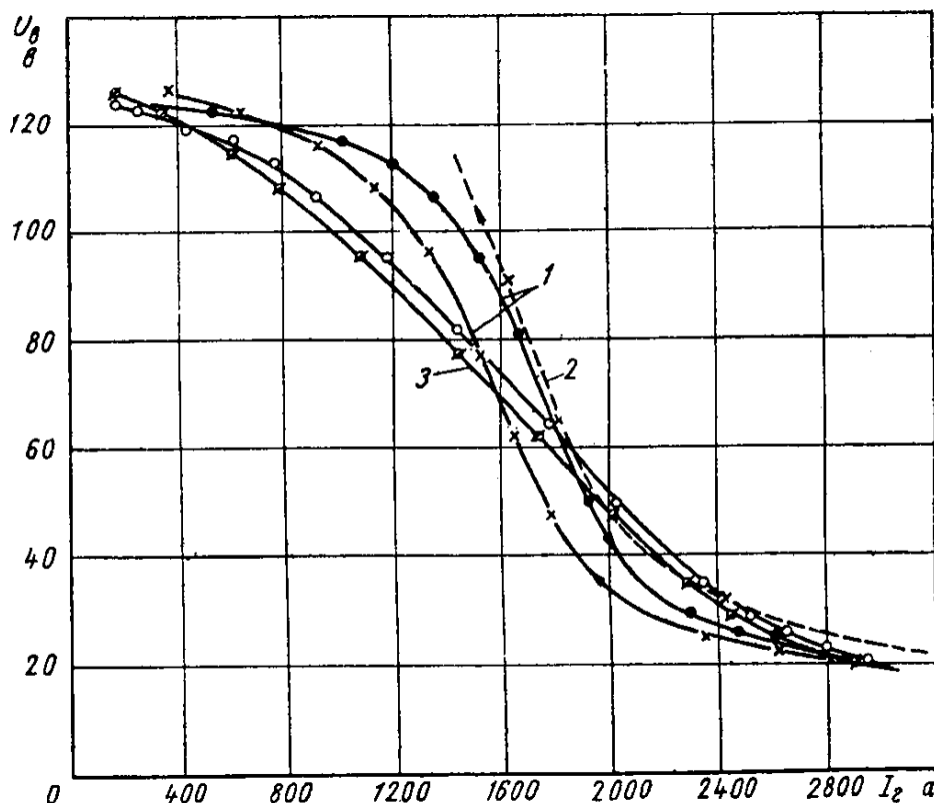


Фиг. 42. Относительные магнитные характеристики генераторов:

- 1 — при нагрузке и холостом ходе тепловоза ТЭЗ; 2 — при холостом ходе тепловоза ТЭ2; 3 — при нагрузке тепловоза ТЭ2; 4 — при холостом ходе тепловоза ДБ; 5 — при нагрузке тепловоза ДБ.

щее действие реакции якоря позволяет дополнительно уменьшить диапазон изменения тока возбуждения в генераторах ТЭ2 и Д^Б. Компенсационная обмотка в генераторе ТЭ3 практически устраняет влияние реакции якоря, и нагрузочная характеристика совпадает с характеристикой холостого хода.

На фиг. 43 приведены опытная характеристика возбудителя тепловоза ТЭ3 (кривая 1) и характеристика, необходимая для использования полной мощности (кривая 2).



Фиг. 43. Характеристики возбудителя тепловоза ТЭ3:

1 — характеристика при нормальном включении независимой, параллельной и дифференциальной обмоток; 2 — характеристика, необходимая для полного использования мощности; 3 — характеристика при неизменном токе в параллельной обмотке.

Сопоставление этих кривых показывает, что вследствие чрезмерной крутизны характеристики 1 напряжение возбудителя при токах более 1900 а ниже требуемого для полной мощности. Наоборот, при уменьшении тока ниже 1700 а требуется более резкое увеличение напряжения вследствие кривизны магнитной характеристики генератора.

Из сопоставления характеристик возбудителей и генераторов (фиг. 38—40) следует, что петля гистерезиса в характеристиках генераторов обусловлена главным образом гистерезисом в магнитной цепи возбудителя, так как гистерезис в магнитной цепи самого генератора относительно мал. В возбудителе тепловоза ТЭ3 напряжение, вследствие гистерезиса, изменяется больше, чем в двух других возбудителях, и отклонение напряжения достигает 16% от максимального значения. Это обусловлено в основном тремя причинами: а) большим диапазоном изменения напряжения (что вызывает большее изменение магнитного потока насыщенных полю-

сов), б) большой крутизной характеристики (вследствие чего относительно небольшое отклонение тока вызывает значительно большее отклонение напряжения) и в) усиливающим влиянием параллельной обмотки насыщенных полюсов, что подтверждается кривой 3 (фиг. 43), построенной для случая, когда параллельная обмотка включена на постоянное напряжение $U_{\text{э max}}$ и число витков дифференциальной обмотки увеличено так, чтобы обеспечить такой же диапазон изменения $U_{\text{э}} = f(I_{\text{э}})$, как для кривой 1. Общее изменение магнитного потока при этом осталось неизменным, но отклонение напряжения вследствие гистерезиса уменьшилось не только в результате меньшей крутизны, но и потому, что петля гистерезиса стала в несколько раз уже.

Из изложенного следует, что возбудители с расщепленными полюсами обеспечивают получение характеристик генератора, близких к кривой постоянной мощности. Отклонение формы характеристик зависит в основном от формы магнитной характеристики генератора: чем больше ее кривизна и насыщение, тем больше отклоняется внешняя характеристика от кривой постоянной мощности. Применение компенсационной обмотки в генераторе оказывает неблагоприятное влияние на форму характеристики генератора из-за большей кривизны магнитной характеристики (в результате добавления второго зубцового слоя) и устранения размагничивающего влияния реакции якоря. Те же факторы (кривизна магнитной характеристики и магнитное насыщение генератора) существенно влияют на отклонение мощности генератора вследствие гистерезиса. Большое магнитное насыщение увеличивает, кроме того, мощность возбудителя, что также затрудняет его выполнение.

Следует отметить также, что компенсационная обмотка усложняет конструкцию и ремонт генератора. Генераторы, проектируемые для новых тепловозов и газотурбовоза, намечено выполнить без компенсационной обмотки. Изготавливается также генератор без компенсационной обмотки для тепловоза ТЭЗ.

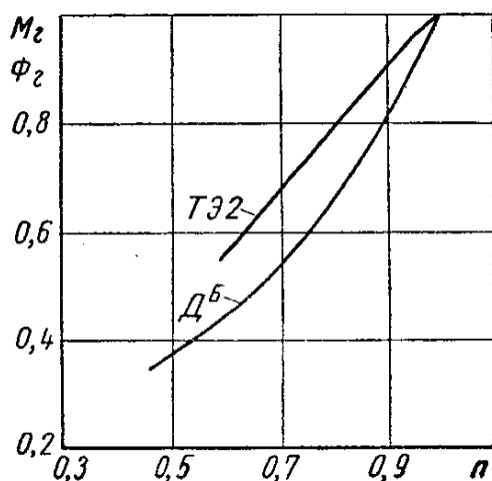
Внешняя характеристика генератора может быть улучшена также применением материалов с пониженной коэрцитивной силой для магнитной цепи возбудителя, уменьшением остаточного магнетизма путем термической обработки деталей и изменением схемы возбуждения возбудителя с целью уменьшения усилительного действия параллельной обмотки. Эти вопросы требуют дальнейших исследований.

При системах с гиперболической характеристикой тепловой двигатель, как правило, снабжается многорежимным регулятором угловой скорости. Для снижения мощности теплового двигателя уменьшается напряжение пружины регулятора, вследствие чего уменьшается угловая скорость двигатель-генератора.

Уменьшение крутящего момента при этом определяется зависимостью магнитного потока генератора от угловой скорости. На фиг. 44 приведены кривые зависимости $\Phi_{\text{э}} = f(n)$ или $M_{\text{э}} = f(n)$ для генераторов тепловозов ТЭ2 и Д^Б при длительном токе генератора и нагретых обмотках. Более крутая характеристика для тепловоза Д^Б

обусловлена влиянием параллельной обмотки возбuditеля, которая усиливает изменение напряжения возбuditеля и магнитного потока генератора, вызываемое изменением угловой скорости. Сопоставление кривой 3 (фиг. 6) и кривой зависимости $M_e = f(n)$ генераторов (фиг. 44) показывает, что по характеристике генераторов момент падает резко, чем по кривой наибольшей экономичности (но разница невелика, в особенности для тепловоза ТЭ2). Изменением схемы возбуждения возбuditеля можно несколько изменить наклон характеристики генератора. С увеличением магнитного насыщения генератора наклон характеристики уменьшается. Изменение температуры обмоток возбуждения генератора и возбuditеля изменяет магнитный поток и, следовательно, перемещает кривую $\Phi_e = f(n)$.

Гиперболическая характеристика генератора может быть получена не только применением специальных возбuditелей, но и путем использования нелинейности характеристики магнитного усилителя. Предложенная Н. В. Гороховым, В. Н. Богоявленским и С. М. Доманицким схема с использованием нелинейности магнитного усилителя была исследована в лаборатории Института автоматики и телемеханики Академии наук СССР и Тепловозного отделения ЦНИИ МПС [4] и показала возможность получения характеристики генератора, близкой к кривой постоянной мощности при возбuditеле обычного типа. В эксплуатации эта схема до сего времени еще не применялась. Принципиально характеристика генератора при этой схеме, ее отклонения, вследствие гистерезиса и изменения температуры обмоток близки к характеристикам, получаемым при возбuditелях с расщепленными полюсами.



Фиг. 44. Зависимость магнитного потока (момента сопротивления) генераторов тепловозов ТЭ2 и ДБ от угловой скорости при длительном токе генератора.

18. ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК МАШИН

Изменение температуры обмоток возбуждения возбuditеля и генератора вызывает существенное отклонение характеристик двигатель-генератора при всех системах саморегулирования. Изменение сопротивления обмоток из-за колебаний температуры приводит к изменению токов в них и изменению соотношения между намагничивающими силами (н. с.) различных обмоток. Следовательно, меняется характер зависимости $\Phi_e = f(I_e)$. Влияние температуры обмоток возбuditеля может быть снижено включением в их цепь больших добавочных сопротивлений, величина которых практически не зависит от температуры. Для обмоток возбуждения генератора

такое решение применяется редко, так как оно связано со значительными потерями мощности и большими размерами сопротивлений.

Изменение температуры обмоток возбуждения вызывается: а) нагреванием в начале движения после длительной стоянки, б) изменением тока в обмотках на перегоне при изменении профиля пути и условий движения и в) изменением наружной температуры. Наибольшее отклонение температуры обусловлено первым фактором, но для поездных локомотивов длительные стоянки редки и отклонения мощности по этой причине непродолжительны и относительно мало сказываются на графике движения. Изменение температуры обмотки возбуждения генератора во время движения относительно невелико, так как при работе с приблизительно постоянной мощностью двигатель-генератора увеличение тока возбуждения сопровождается уменьшением тока в якоре и дополнительных полюсах, что понижает температуру воздуха внутри генератора. Изменения наружной температуры зависят от климатических условий, в которых работают локомотивы, и для некоторых районов колебания в течение года достигают $60\text{--}80^\circ\text{C}$, а в течение суток — $20\text{--}30^\circ\text{C}$.

В зависимости от того, как работает тепловой двигатель — при постоянной подаче топлива или при постоянной угловой скорости, — изменение температуры обмоток оказывает различное влияние на режим работы двигатель-генератора.

Саморегулирование при генераторе с выпуклой внешней характеристикой возможно только при неизменной подаче топлива. В системах с гиперболической характеристикой генератора и многорежимным регулятором теплового двигателя двигатель-генератор может работать при постоянной угловой скорости (когда генератор недогружает тепловой двигатель) или при постоянной подаче топлива (когда регулятор теплового двигателя находится в положении максимальной подачи топлива). В зависимости от взаимной настройки теплового двигателя (т. е. положения «упора» исполнительного органа регулятора) и генератора (настройки его внешней характеристики), а также от температуры обмоток последнего может быть получен один из указанных режимов работы.

Когда двигатель работает при постоянной подаче топлива, изменение температуры и сопротивлений обмоток возбуждения возбудителя и генератора вызывает изменение угловой скорости. Для различных схем саморегулирования можно установить зависимость угловой скорости от сопротивления обмоток возбуждения. Выведем эту зависимость для схемы фиг 32, г.

Магнитный поток генератора равен

$$\Phi_g = \lambda_g (w_n i_n - w'_c I_g),$$

где λ_g — магнитная проводимость магнитной цепи генератора;

w_n — число витков на полюс обмотки независимого возбуждения генератора;

w'_c — приведенное число витков последовательной обмотки (с учетом размагничивающего влияния реакции якоря);

i_n — ток обмотки независимого возбуждения генератора в а.

Ток обмотки независимого возбуждения генератора равен (пренебрегая сопротивлением возбудителя)

$$i_n = \frac{E_v}{R_{nv}} = \frac{C_v \Phi_v n}{R_{nv}},$$

где E_v — э. д. с. возбудителя в в ;

R_{nv} — сопротивление обмотки независимого возбуждения генератора в ом ;

C_v — постоянная возбудителя (включающая передаточное отношение между ним и тепловым двигателем).

Магнитный поток Φ_v возбудителя можно выразить равенством

$$\Phi_v = \lambda_v w_{nv} i_{nv} = \lambda_v w_{nv} \frac{U_b}{R_{nv} + R_1},$$

где λ_v — магнитная проводимость магнитной цепи возбудителя ;

w_{nv} — число витков на полюс возбудителя ;

i_{nv} — ток обмотки независимого возбуждения возбудителя в а ;

U_b — напряжение аккумуляторной батареи в в ;

R_{nv} — сопротивление обмотки независимого возбуждения возбудителя в ом ;

R_1 — добавочное сопротивление в цепи обмотки.

Исключая i_n и Φ_v из приведенных выше равенств, получим уравнение

$$n = \frac{\Phi_g + \lambda_g w'_g I_g}{C_v \lambda_g \lambda_v w_n w_{nv} U_b} R_n (R_{nv} + R_1). \quad (21)$$

С увеличением температуры обмоток возбуждения растет величина их сопротивлений и, как видно из равенства (21), при постоянном значении Φ_g увеличивается угловая скорость двигатель-генератора. Для выяснения характера изменения мощности рассмотрим установившийся режим работы двигатель-генератора при заданном токе генератора и некотором увеличении R_n и R_{nv} .

Если пренебречь изменением крутящего момента теплового двигателя (вследствие изменения угловой скорости), то магнитный поток и магнитная проводимость генератора сохраняются неизменными и, следовательно, угловая скорость и мощность двигатель-генератора увеличиваются пропорционально произведению сопротивлений. Таким образом, при нагретых обмотках двигатель-генератор развивает мощность больше, чем при холодных. Изменение момента, магнитного потока и проводимостей несколько меняет количественные соотношения, но характер зависимости сохраняется.

Для тепловоза ТЭ2 при работе теплового двигателя с неизменной подачей топлива (регулятор в положении упора) аналогичная зависимость имеет вид (при питании обмотки возбуждения возбудителя только от вспомогательного генератора)

$$n = \frac{\Phi_g R_n (R_{nv} + R_1)}{C_v \lambda_g w_n [(\lambda_1 + \lambda_2) w_{nv} U_{vg} - \lambda_2 w_g I_g (R_1 + R_{nv})]}, \quad (22)$$

где λ_1, λ_2 — магнитные проводимости ненасыщенных и насыщенных полюсов возбудителя ;

$w_{нв}, w_2$ — числа витков независимой и дифференциальной обмоток возбуждения возбудителя ;

$U_{вг}$ — напряжение вспомогательного генератора в $в$.

Так же как в предыдущем случае, повышение температуры обмоток приводит к увеличению угловой скорости и мощности двигатель-генератора. Сопротивление цепи возбуждения возбудителя более резко влияет на режим, чем сопротивление цепи возбуждения генератора, в особенности при больших токах нагрузки ; поэтому для уменьшения отклонений режима при колебаниях температуры важно включать добавочное сопротивление R_1 , в несколько раз превышающее сопротивление $R_{нв}$ обмотки и не зависящее от температуры.

При работе теплового двигателя с неполной подачей топлива регулятор поддерживает постоянную угловую скорость и изменяет подачу топлива в соответствии с потребляемой мощностью. В этом случае с изменением температуры обмоток изменяется момент двигатель-генератора.

Приближенная зависимость электромагнитного момента генератора тепловоза ТЭ2 (при независимом питании обмотки возбуждения возбудителя) от угловой скорости :

$$M_g = C'_g \Phi_g I_g = \frac{C'_g C_v \lambda_g w_n n I_g}{R_n} \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{R_1 + R_{нв}} w_{нв} U_{вг} - \lambda_2 w_2 I_g \right). \quad (23)$$

Увеличение сопротивлений R_n и $R_{нв}$ приводит к уменьшению момента и мощности двигатель-генератора, причем и в этом случае сопротивление цепи возбуждения возбудителя влияет более резко. Криволинейность магнитной характеристики генератора ослабляет влияние температуры обмоток на мощность.

По результатам паспортных испытаний тепловоза ТЭ2 [19] при токе генератора $I_g = 700$ а и при повышении температуры обмотки возбуждения генератора с 20 до 56° С и обмотки возбуждения возбудителя с 6 до 19,5° С мощность генератора понизилась с 570 до 500 квт, т. е. на 12%.

Подсчет по формуле (23) при изменении только R_n и $R_{нв}$ (с пренебрежением членом $w_2 I_g$) дает уменьшение на 14%.

При токе $I_g = 1200$ а по опытным данным получено снижение мощности на 10%. Подсчет по формуле (23) для условий опыта и при тех же допущениях дал снижение на 8%. Меньшее отклонение по расчету во втором случае объясняется в основном пренебрежением членом $w_2 I_g$, так как магнитная цепь генератора при токе 1200 а не насыщена и магнитная проводимость мало изменяется.

В первом примере магнитная проводимость генератора существенно изменяется, а член $w_2 I_g$ мал. Поэтому действительное отклонение мощности меньше расчетного.

В средних условиях эксплуатации температура обмотки генератора тепловоза ТЭ2 изменяется на 60—80° С (если исключить пониженные температуры в период начального пуска) и мощность — на 20—30%. Настройка генератора должна производиться так, чтобы

полная мощность реализовалась при средней температуре. Тогда при холодной обмотке угловая скорость и мощность будут снижаться. При повышенном нагреве уменьшатся крутящий момент и вместе с ним мощность. В этом случае наибольшее отклонение мощности составит 10—15% от номинальной.

19. ДИНАМИКА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ПРИ САМОРЕГУЛИРОВАНИИ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Устойчивость работы автоматически регулируемых установок и характер переходных процессов зависит от параметров и характеристик самой установки (регулируемого объекта) и от параметров и характеристик элементов регулирующих устройств. В теплоэлектрическом подвижном составе регулируемым объектом является по существу вся силовая установка, включающая тепловой двигатель, генератор и электродвигатели (система ТД-Г-ЭД).

В системах с выпуклыми характеристиками генератора при основных режимах движения регулятор теплового двигателя бездействует. В системах с гиперболическими характеристиками генератора регулятор теплового двигателя находится в положении «упора» и бездействует при среднеэксплуатационной или более низких температурах обмотки возбуждения. В этих режимах, т. е. при работе теплового двигателя, генератора и тяговых электродвигателей без внешнего регулирования, устойчивость работы и характер переходных процессов определяются параметрами и характеристиками теплового двигателя, электрической передачи и поезда.

Для аналитического исследования устойчивости в соответствии с теорией автоматического регулирования следует вывести дифференциальные уравнения отдельных узлов системы и применить к ним какой-либо из критериев устойчивости [1], [12], [15].

В работе [18] автор привел вывод и общий анализ уравнений динамики обобщенной системы, состоящей из поезда, тяговых электродвигателей последовательного возбуждения, генератора и теплового двигателя, а также для конкретных условий тепловоза ТЭ2.

Ниже приводятся исходные уравнения для тепловоза ТЭ2 (фиг. 37) и полученная из них система уравнений динамики в форме, принятой в теории автоматического регулирования.

Уравнение движения поезда для тяговых расчетов используется обычно в следующей форме:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\zeta(F - W)}{P + Q},$$

где ζ — коэффициент, зависящий от выбора единиц измерения и учитывающий также инерцию вращающихся масс;

P — вес локомотива в m ;

Q — вес поезда в m .

Для силовой цепи, если пренебречь влиянием вихревых токов в магнитной цепи тяговых электродвигателей (что не вносит сущест-

венной ошибки при исследовании относительно медленных процессов изменения возбуждения генератора и угловой скорости двигатель-генератора), можно написать уравнение

$$E_g = C_g \Phi_g n = s E_m + I_g R'_c + L_c \frac{dI_g}{dt} = s C_m \Phi_m v + I_g R_c + L_c \frac{dI_g}{dt},$$

где s — число последовательно соединенных электродвигателей в группе;

C_m — постоянная электродвигателя;

Φ_m — магнитный поток электродвигателя в $\text{в} \cdot \text{сек}$;

R_c — эквивалентное сопротивление силовой цепи в ом ;

L_c — эквивалентная индуктивность силовой цепи в генри;

E_m — э. д. с. двигателя в в .

Вращение двигатель-генератора можно выразить уравнением

$$J \frac{dn}{dt} = M_d - M_g = f(x, n) - C'_g \Phi_g I_g,$$

где J — момент инерции вращающихся масс двигатель-генератора;

x — координата исполнительного органа регулятора теплового двигателя.

Для цепи возбуждения генератора исходными уравнениями являются равенства (при замене магнитной характеристики генератора касательной в точке рассматриваемого режима работы)

$$\Phi_g = \Phi_{g0} + \frac{\partial \Phi_g}{\partial A W_g} (w_n i_n + A W_p);$$

$$E_g = R_n i_n + 2p_g \sigma_n w_n \frac{d\Phi_g}{dt} = C_g \Phi_g n,$$

где Φ_{g0} — отрезок на оси ординат, отсекаемый касательной к магнитной характеристике генератора в точке установившегося режима работы;

σ_n — коэффициент магнитного рассеяния генератора;

p_g — число пар полюсов генератора;

$A W_p$ — н. с., эквивалентная влиянию реакции якоря на магнитный поток;

E_g — э. д. с. возбuditеля в в ;

i_n — ток возбуждения генератора в а ;

Φ_g — магнитный поток возбuditеля.

Магнитный поток возбuditеля с расщепленными полюсами состоит из потока ненасыщенных полюсов Φ_1 и потока насыщенных полюсов Φ_2 , для которых можно, пренебрегая реакцией якоря, написать равенства:

$$\Phi_1 = \Phi_{10} + \frac{\partial \Phi_1}{\partial A W_1} w_{nv} i_{nv};$$

$$\Phi_2 = \Phi_{20} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial A W_2} (w_{nv} i_{nv} - w_{dv} I_g),$$

где Φ_{10} и Φ_{20} — отрезки, отсекаемые касательными к магнитным характеристикам ненасыщенных и насыщенных полюсов на оси ординат;

$w_{нв}$ и $w_{\partial в}$ — числа витков на полюс независимой и дифференциальной обмоток возбuditеля.

Для цепи обмотки независимого возбуждения возбuditеля, пренебрегая влиянием тока, проходящего через сопротивление R_2 (фиг. 37), можно написать уравнение

$$U_{вз} = (R_{нв} + R_1) i_{нв} + 2p_{\partial} \sigma_{\partial} w_{нв} \frac{d\Phi_{\partial}}{dt};$$

где p_{∂} — число пар полюсов возбuditеля;

σ_{∂} — коэффициент магнитного рассеяния возбuditеля.

Из написанных выше равенств (для приведения их к виду, удобному для анализа условий устойчивости) исключаются величины i_n и $i_{нв}$. Путем разложения равенства в ряд Тейлора переменные величины заменяются их отклонениями от установившегося режима работы, которые, в свою очередь, заменяются безразмерными отклонениями, полученными путем деления абсолютных отклонений переменных величин на номинальные значения этих величин.

После указанных преобразований получаем систему линейных уравнений, в которых для безразмерных отклонений приняты те же обозначения, как для соответствующих физических величин, но с черточками наверху.

Уравнение движения поезда (П)

$$(T_v p + 1) \bar{v} = k_v \bar{I}_z; \quad (24)$$

уравнение вращения двигатель-генератора (ДГ)

$$(T_{\partial} p + 1) \bar{n} = k_x \bar{x} - k_{1\partial} \bar{\Phi}_z - k_{2\partial} \bar{I}_z; \quad (25)$$

уравнение возбуждения генератора (ВГ)

$$(T_z p + 1) \bar{\Phi}_z = k_{z1} \bar{\Phi}_{\partial} + k_{z2} \bar{n}; \quad (26)$$

уравнение силовой цепи (СЦ)

$$(T_c p + 1) \bar{I}_z = k_{1c} \bar{\Phi}_z + k_{2c} \bar{n} - k_{3c} \bar{v}; \quad (27)$$

уравнение возбуждения возбuditеля (ВВ)

$$(T_{\partial} p + 1) \bar{\Phi}_{\partial} = -k_{2\partial} \bar{I}_z, \quad (28)$$

где постоянные времени равны

$$T_v = \frac{P + Q}{\zeta \frac{dW}{dt}}; \quad T_{\partial} = - \frac{J n_n}{M_{\partial n} \frac{\partial M_{\partial}}{\partial n}};$$

$$T_z = \frac{2 p_z \sigma_n w_n \Phi_{zn}}{U_{вн}} = \frac{2 p_z \sigma_n w_n^2}{R_n} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial A W_z};$$

$$T_c = \frac{L_c I_{zn}}{R_c I_{zn} + s E_{мн} \frac{v_y}{v_n} \cdot \frac{d\Phi_{м}}{dI_{6м}}}; \quad T_{\partial} = \left(\frac{d\Phi_1}{dAW_1} + \frac{d\Phi_2}{dAW_2} \right) \frac{2 p_{\partial} \sigma_{\partial} w_{нв}^2}{R_{нв} + R_1}.$$

Передаточные коэффициенты равны:

$$k_v = \frac{\partial F}{\partial W}; \quad k_x = -\frac{\partial M_\partial}{\partial x}; \quad k_{1\partial} = -\frac{\Phi_{zy}}{\frac{\partial M_\partial}{\partial n}};$$

$$k_{2\partial} = -\frac{I_{zy}}{\frac{\partial M_\partial}{\partial n}}; \quad k_{21} = \frac{n_y}{n_H} \cdot \frac{d \Phi_z}{d A W_z};$$

$$k_{22} = \frac{\Phi_{zy}}{\Phi_{vH}} \cdot \frac{d \Phi_z}{d A W_z}; \quad k_{1c} = \frac{E_{zH}}{R_c I_{zH} + s E_{MH} \frac{v_y}{v_H} \cdot \frac{d \Phi_M}{d I_{вм}}} \cdot \frac{n_y}{n_H};$$

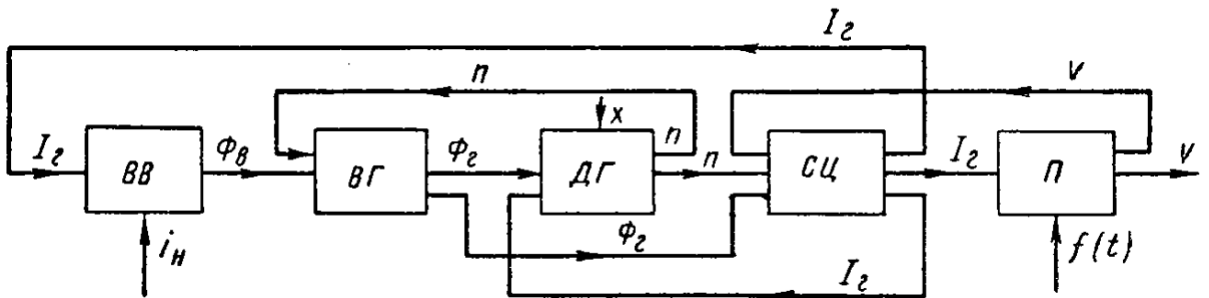
$$k_{2c} = \frac{E_{zH}}{R_c I_{zH} + s E_{MH} \frac{v_y}{v_H} \cdot \frac{d \Phi_M}{d I_{вм}}} \cdot \frac{\Phi_{zy}}{\Phi_{zH}};$$

$$k_{3c} = \frac{s E_{MH}}{R_c I_{zH} + s E_{MH} \frac{v_y}{v_H} \cdot \frac{d \Phi_M}{d I_{вм}}} \cdot \frac{\Phi_{My}}{\Phi_{MH}};$$

$$k_{2\partial} = \frac{d \Phi_z}{d A W_z} \cdot \frac{w_{\partial v} I_{zH}}{\Phi_{vH}}.$$

В этих выражениях производные определяются по относительным характеристикам соответствующих элементов в точке установившегося режима. Значения величин, относящихся к номинальному режиму, снабжены индексом «н» и относящихся к установившемуся режиму — индексом «у».

Структурная схема, соответствующая системе уравнений (24)—(28), приведена на фиг. 45.



Фиг. 45. Структурная схема для тепловоза ТЭ2 при постоянном положении регулирующего органа дизеля.

Система уравнений (24)—(28) является линейной и лишь приближенно описывает явления, происходящие в действительности. Допущения, принятые при выводе уравнений (24)—(27) (замена характеристик теплового двигателя, генератора и электродвигателей касательными, пренебрежение вихревыми токами, гистерезисом в генераторе и электродвигателях, нелинейностью реакции якоря и магнитного рассеяния) не вносят существенных искажений в условия статической устойчивости при малых отклонениях от рассматри-

ваемого режима. При выводе уравнения (28) отклонения линейной модели от действительного процесса более существенны в связи с значительным влиянием гистерезиса и магнитного рассеяния в магнитной цепи возбудителя; кроме этого, в линейном уравнении не учитывается то, что нелинейность характеристики возбудителя обеспечивает гиперболическую внешнюю характеристику генератора, при которой момент сопротивления генератора сохраняется приблизительно постоянным при изменении скорости движения. Поэтому расчеты устойчивости с учетом влияния возбудителя являются приближенными.

С целью выяснения влияния отдельных элементов системы и их параметров на условия устойчивости, автором проделаны расчеты применительно к трем режимам движения тепловоза ТЭ2 с поездом 3000 т: 1) при скорости 21 км/час и полном поле электродвигателей, 2) при скорости 37 км/час и ослабленном поле и 3) при скорости 90 км/час и ослабленном поле. Первый режим работы характерен слабым насыщением магнитной цепи генератора и сильным насыщением магнитной цепи электродвигателей. При втором — генератор также слабо насыщен, двигатели работают при среднем насыщении. Для третьего режима характерно сильное насыщение генератора и слабое насыщение двигателей. Параметры машин при этих режимах определялись по паспортным данным [19]. Регулятор дизеля принимался установленным в положении упора и, следовательно, отклонение положения исполнительного органа его принималось $\bar{x} = 0$.

Как показал анализ уравнений, условия устойчивой работы существенно зависят от наклона внешней характеристики дизеля, который определяется величиной $\frac{\partial M_d}{\partial n}$. Эта величина изменяется не только для различных типов дизелей, но и для каждого данного дизеля при изменении угловой скорости, причем для большинства дизелей, как видно из фиг. 1, она меняет при этом знак.

При расчетах определялось граничное значение $\frac{\partial M_d}{\partial n}$ (в относительных единицах) между областями устойчивой и неустойчивой работы системы, т. е. то значение, превышение которого приводит систему к потере устойчивости. Для выяснения влияния отдельных звеньев условия устойчивости проверялись для различных сочетаний уравнений системы. Например, определение условия устойчивости для отдельно взятого уравнения (25) показывает максимальное значение $\frac{\partial M_d}{\partial n}$, при котором возможна устойчивая работа двигатель-генератора при неизменных подаче топлива, магнитном потоке и токе нагрузки. Присоединение к уравнению (25) уравнения (27) позволяет выяснить условия устойчивости при включении генератора на электродвигатели при неизменных скорости движения, подаче топлива и магнитном потоке генератора и т. д. Из сопоставления граничных значений $\frac{\partial M_d}{\partial n}$ при различных режимах можно вывести некоторые заключения о влиянии отдельных параметров. Результаты анализа приведены в табл. 4.

Максимальные значения $\frac{\partial M_{\partial}}{\partial n}$ (в относительных единицах) для устойчивой работы

Таблица 4

№ по пор.	Обозначение включенных звеньев	Расчетные выражения для максимального значения $\frac{\partial M_{\partial}}{\partial n}$	Режим 1	Режим 2	Режим 3
1	ДГ	0	0	0	0
2	ДГ-СЦ	$\frac{\kappa_{2c} \kappa_{1\partial}}{0,4 T_{\partial}}$	4,0	1,01	0,29
3	ДГ-СЦ-П	$\frac{\kappa_{2c}}{0,4(1 + \kappa_v \kappa_{3c})} \cdot \frac{\kappa_{1\partial}}{T_{\partial}}$	0,082	0,135	0,210
4	ВГ-ДГ	$\frac{\kappa_{2\partial} \kappa_{22}}{T_{\partial} 0,4}$	0,95	0,95	0,19
5	ВГ-ДГ-СЦ	или $\frac{1}{0,4 T_{\partial}} + \frac{\kappa_{1c} \kappa_{1\partial}}{0,4 T_{\partial}}$ $\frac{\kappa_{22} \kappa_{2\partial}}{0,4 T_{\partial}} + \frac{\kappa_{2c} \kappa_{1\partial}}{0,4 T_{\partial}} + \frac{\kappa_{1c} \kappa_{22} \kappa_{1\partial}}{0,4 T_{\partial}}$	5,56	2,57	
6	ВВ-ВГ-ДГ	$\frac{\kappa_{2\partial} \kappa_{22}}{T_{\partial} 0,4}$	0,95	0,95	0,19
7	ВВ-ВГ-ДГ-СЦ	$\frac{(\kappa_{2c} + \kappa_{22} \kappa_{1c}) \frac{\kappa_{1\partial}}{T_{\partial}} + (\kappa_{22} - \kappa_{21} \kappa_{2\partial} \kappa_{2c}) \frac{\kappa_{2\partial}}{T_{\partial}}}{0,4(1 + \kappa_{21} \kappa_{2\partial} \kappa_{1c})}$	0,97	0,96	0,53
8	ВВ-ВГ-ДГ-СЦ-П	$\frac{(\kappa_{2c} + \kappa_{1c} \kappa_{22}) \frac{\kappa_{1\partial}}{T_{\partial}} + (\kappa_{22} + \kappa_{22} \kappa_{\partial} \kappa_{3c} - \kappa_{21} \kappa_{2\partial} \kappa_{2c}) \frac{\kappa_{2\partial}}{T_{\partial}}}{0,4(1 + \kappa_{21} \kappa_{2\partial} \kappa_{1c} + \kappa_v \kappa_{3c})}$	0,95	0,96	0,46

Из табл. 4 следует, что при падающей внешней характеристике теплового двигателя $\left(\frac{\partial M_d}{\partial n} < 0\right)$ установка работает устойчиво во всех случаях. Если магнитный поток и ток нагрузки постоянны (условие 1), то работа при возрастающей внешней характеристике становится неустойчивой. Присоединение тяговых электродвигателей (при постоянной скорости движения) существенно расширяет область устойчивой работы.

В этом можно убедиться, сопоставляя соответственно максимальные значения $\frac{\partial M_d}{\partial n}$ для пп. 1, 5 и 7 и для пп. 1, 4 и 6 (табл. 4). В структурной схеме (фиг. 45) влияние силовой цепи на работу двигатель-генератора характеризуется отрицательной обратной связью по току. В формулах, определяющих границу устойчивости, влияние силовой цепи может быть выражено передаточными коэффициентами силовой цепи k_{1c} и k_{2c} , которые показывают, во сколько раз относительное отклонение тока больше, чем вызвавшее его отклонение угловой скорости (или магнитного потока). С увеличением насыщения магнитной цепи двигателей коэффициенты k_{1c} и k_{2c} увеличиваются, и стабилизирующее действие обратной связи по току возрастает. Физическое объяснение стабилизирующего действия обратной связи заключается в том, что увеличение тока, являющееся результатом увеличения угловой скорости при разгрузке теплового двигателя, приводит к увеличению момента сопротивления генератора и тем противодействует увеличению угловой скорости. Постоянная времени силовой цепи мала и, как показали расчеты, практически не влияет на условие устойчивости. Поэтому в приближенных расчетах ее можно принимать равной нулю.

Присоединение поезда (т. е. учет изменения скорости движения), наоборот, уменьшает запас устойчивости, что следует из сопоставления пп. 3 и 8 с пп. 2 и 7 (табл. 4) и объясняется тем, что увеличение скорости движения, вызываемое ростом тока и силы тяги, приводит к увеличению э. д. с. тяговых двигателей и снижению тока, т. е. увеличение скорости ослабляет стабилизирующее влияние силовой цепи. В структурной схеме влияние поезда характеризуется отрицательной обратной связью между выходом звена П и входом звена СЦ. Влияние изменения скорости зависит главным образом от коэффициента k_v , увеличивающегося с ростом угла наклона характеристики $F = f(I)$ тягового электродвигателя, т. е. с ростом магнитного потока электродвигателя. При постоянном магнитном потоке генератора из-за влияния изменения скорости движения резко снижается запас устойчивости, причем значительнее всего при большом магнитном насыщении электродвигателей, хотя при этом величина k_{1c} является наибольшей.

Постоянная времени поезда более чем в 100 раз превышает постоянные времени всех остальных элементов системы. Практически переходные процессы в силовой установке заканчиваются раньше, чем скорость поезда существенно изменится. Однако последующее изменение скорости будет вызывать изменение режима работы

силовой установки, которое при несоблюдении условий устойчивости может привести к остановке двигатель-генератора. Этот процесс протекает относительно медленно и может быть прерван изменением условий движения или вмешательством машиниста. Увеличение угловой скорости двигатель-генератора не опасно, так как это приведет в действие регулятор теплового двигателя. Более опасна возможность возникновения незатухающих колебаний.

Присоединение возбудителя (уравнение ВГ) повышает запас устойчивости, хотя и в меньшей степени, чем присоединение силовой цепи. Стабилизирующее воздействие возбудителя физически объясняется тем, что при увеличении угловой скорости растет э. д. с. возбудителя и магнитный поток генератора, что противодействует увеличению угловой скорости. В структурной схеме взаимное влияние звеньев ВГ и ДГ (фиг. 45) характеризуется отрицательной связью выхода ВГ с входом ДГ по магнитному потоку Φ_z и положительной связью выхода ДГ с входом ВГ по угловой скорости n . Влияние положительной связи по n уменьшается по мере насыщения магнитной цепи генератора, что количественно характеризуется величиной передаточного коэффициента k_{22} , пропорционального $\frac{\partial \Phi_z}{\partial A W_z}$. При возбудителе с расщепленными полюсами на магнитный поток возбудителя Φ_e и далее на Φ_z оказывает также влияние ток I_z . В структурной схеме это влияние представлено отрицательной обратной связью по току I_z между выходом СЦ и входом ВВ. Передаточный коэффициент k_{2a} , характеризующий эту связь, входит в числитель граничного значения $\frac{\partial M_d}{\partial n}$ в пп. 7 и 8 (табл. 4) со знаком «минус» и в знаменатель — со знаком «плюс» и, следовательно, как указывалось выше, понижает запас устойчивости. Физически это объясняется тем, что уменьшение магнитного потока возбудителя и генератора, вследствие увеличения тока, противодействует увеличению момента генератора при возрастании угловой скорости и тем ослабляет стабилизирующее действие силовой цепи и возбудителя. Вместе с тем необходимо отметить, что присоединение возбудителя с расщепленными полюсами в целом (звенья ВВ—ВГ) всегда существенно повышает запас устойчивости, как это следует из сопоставления пп. 1 и 6, или 2 и 7, или, наконец, 3 и 8, вследствие изменения э. д. с. возбудителя при изменении угловой скорости теплового двигателя.

Присоединение возбудителя вызывает также уменьшение неблагоприятного влияния скорости движения поезда на запас устойчивости, что видно из сопоставления пп. 3 и 8.

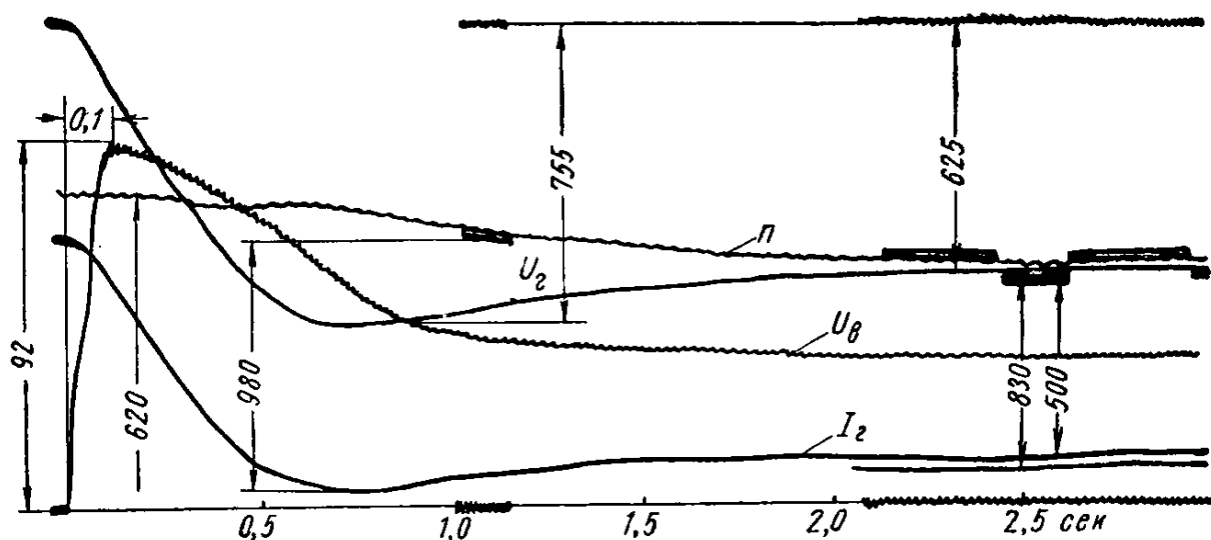
Нагрузка генератора на реостат равнозначна (как показывает анализ уравнений) включению его на двигатели с ненасыщенной магнитной цепью (без учета изменения скорости движения — «без поезда»). Поэтому при нагрузке генератора на реостат запас устойчивости, как правило, больше, чем при движении тепловоза с поездом. При постоянном магнитном потоке генератора минимальное значение $\frac{\partial M_d}{\partial n}$ при нагрузке на реостат приблизительно в 7 раз боль-

ше, чем при движении с поездом. В случае присоединения возбудителя эта разница уменьшается примерно в 2 раза. Следовательно, при реостатных испытаниях новых схем необходимо добиваться повышенного запаса устойчивости их и проводить последующую проверку в поездных условиях.

Многочисленные опыты, проведенные с различными системами саморегулирования (тепловозы Д^А, Д^Б, ТЭ1, ТЭ2, ТЭ3, автобус ЗИС-154 и др.), как при нагрузке генератора на реостат, так и в поездных условиях, показали, что системы саморегулирования работают устойчиво при различных угловых скоростях и нагрузках. Нарушений устойчивости не наблюдалось ни при плавных, ни при скачкообразных изменениях режима работы.

При исследовании систем автоматического регулирования теплэлектрического подвижного состава как на модели в лабораторных условиях, так и в натуре осциллографировались переходные процессы при различных нарушениях установившегося режима двигатель-генератора при нагрузке его на реостат и при движении с поездом на опытном кольце ЦНИИ МПС.

Ниже приводится краткий анализ наиболее характерных переходных процессов в системах саморегулирования по некоторым из полученных осциллограмм.

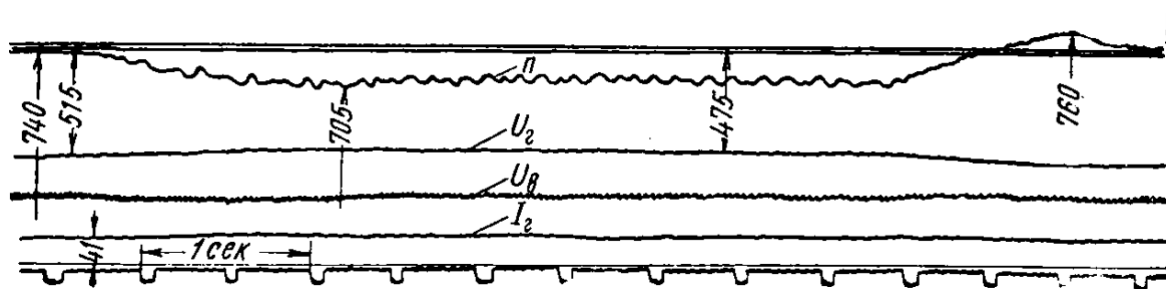


Фиг. 46. Осциллограмма включения цепи возбуждения генератора тепловоза Д^Б при включенной силовой цепи и работающем возбудителе.

Осциллограмма фиг. 46 представляет собой переходный процесс при замыкании цепи возбуждения генератора тепловоза Д^Б. Дизель-генератор перед включением возбудителя вращался со скоростью 620 об/мин, генератор присоединен к нагрузочному реостату, возбудитель имел возбуждение по нормальной схеме (но без регулятора возбуждения). Напряжение U_v на зажимах обмотки возбуждения в течение 0,1 сек. достигает максимального значения. Ток I_2 и напряжение U_2 генератора увеличиваются одновременно до максимального значения и затем несколько падают. Вследствие размагничивающего действия дифференциальной обмотки напряжение возбудителя уменьшается по мере увеличения тока генератора.

Вначале, при насыщенном состоянии насыщенных полюсов напряжение возбудителя падает медленней, чем увеличивается ток, затем более быстро, чему способствует также уменьшение угловой скорости n дизель-генератора, от которого приводится возбудитель.

Из-за большой постоянной времени возбуждения генератора процесс уменьшения его напряжения начинается с отставанием во времени от снижения напряжения возбудителя. Поэтому в переходном процессе кривые напряжения и тока имеют забросы на 17—20%, превышающие установившиеся значения. В результате этих забросов мощность, потребляемая генератором, значительно превышает мощность дизеля, что приводит к снижению угловой скорости n приблизительно на 20% от начальной. Угловая скорость записана на осциллограмме как разность напряжения тахогенератора и напряжения аккумуляторной батареи. Разностное включение шлейфа применено для увеличения масштаба изменения n . По мере снижения напряжения и мощности генератора угловая скорость увеличивается, но относительно медленно из-за того, что механическая постоянная дизель-генератора велика (она в несколько раз превышает постоянную времени возбуждения генератора) и этот процесс в осциллограмме не отражен. Весь переходный процесс протекает аperiodически, без колебаний. Недостатком его является значительная перегрузка дизеля и снижение его угловой скорости. Основной причиной перегрузки является большая постоянная времени возбуждения генератора, вызывающая отставание в уменьшении напряжения генератора.



Фиг. 47. Осциллограмма включения и выключения одного из цилиндров дизеля на тепловозе ТЭ2.

Осциллограмма фиг. 47 снята на тепловозе ТЭ2-253 при нагрузке генератора на реостат. На ней записан переходный процесс при выключении и включении одного из шести цилиндров дизеля. Перед выключением напряжение генератора равнялось 515 в, ток 1060 а, угловая скорость 740 об/мин. После выключения цилиндра момент, развиваемый дизелем, уменьшился приблизительно на 16—17% и угловая скорость постепенно снизилась до 705 об/мин, т. е. приблизительно на 5%. Напряжение генератора уменьшилось при этом почти на 9%. Мощность, которая при неизменном сопротивлении реостата пропорциональна квадрату напряжения, снизилась приблизительно на 19%, что, с учетом некоторого увеличения момента дизеля при снижении угловой скорости, примерно соответствует

изменению момента и угловой скорости дизеля. Переходный процесс длится около 1,3 сек.

Через 4,5 сек. цилиндр был вновь включен и момент дизеля увеличился, угловая скорость и напряжение также начали увеличиваться. На осциллограмме виден небольшой заброс угловой скорости на 2,0—2,5% сверх установившегося значения. Он объясняется отставанием изменения возбуждения генератора от изменения угловой скорости и задержкой работы центробежного регулятора дизеля.

Записанный процесс может наблюдаться в эксплуатации в случае выпадения из работы одного из цилиндров дизеля вследствие засорения форсунки, неисправности топливного насоса и т. д. Вместе с тем он имитирует в известной мере более часто встречающееся в эксплуатации отклонение момента на валу генератора из-за включения и выключения вентилятора холодильника или компрессора.

ГЛАВА V

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

20. ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Замкнутые системы автоматического регулирования используются в теплоэлектрическом подвижном составе, как и рассмотренные системы саморегулирования для решения тех же задач: повышения использования мощности теплового двигателя, повышения экономичности и надежности его работы и улучшения пусковых характеристик локомотива.

Основное отличие замкнутых систем автоматического регулирования мощности от систем саморегулирования заключается в наличии узла сравнения, в котором регулируемая величина сравнивается с некоторым заданным уровнем. Отклонение регулируемой величины от заданного уровня вызывает изменение магнитного потока генератора в направлении уменьшения отклонения.

Наличие такого узла приводит к качественному изменению характера работы и точности регулирования. При саморегулировании подбором внешней характеристики генератора можно добиться, чтобы отклонение мощности теплового двигателя при изменении тока нагрузки было достаточно малым. Однако при этом нельзя устранить отклонения мощности генератора, вызываемые другими причинами (изменением температуры обмоток, гистерезисом в магнитной цепи, производственными отклонениями характеристик генератора и возбuditеля и их сопротивлений и т. д.). Кроме того, мощность, которую тепловой двигатель может передать генератору, не остается постоянной, вследствие изменения расхода мощности на вспомогательные устройства, изменения температуры и давления воздуха, качества топлива, состояния форсунок и т. д. Поэтому для полного использования той мощности, которую тепловой двигатель развивает при заданном положении регулирующего органа, нужно, чтобы режим работы генератора соответственно изменялся.

Второй особенностью замкнутых систем регулирования мощности является тесная связь между регуляторами теплового двигателя и генератора. При саморегулировании регулятор теплового двигателя бездействует. Он вступает в действие лишь тогда, когда генератор

не может полностью нагрузить двигатель. При этом регулятор измеряет угловую скорость двигатель-генератора и поддерживает ее постоянной, регулируя подачу топлива в соответствии с мощностью, потребляемой генератором.

Замкнутые системы, согласно определению, имеют второе регулирующее устройство, которое измеряет некоторую регулируемую величину, характеризующую мощность теплового двигателя, и поддерживает ее постоянной, изменяя магнитный поток генератора или его возбудителя. В дальнейшем такое устройство, состоящее в общем случае из комплекта машин, аппаратов или их обмоток, называется регулятором генератора.

Регулятор теплового двигателя и регулятор генератора могут представлять собой самостоятельные устройства, работающие поочередно или одновременно, но могут также быть связаны между собой конструктивно. Во всех случаях характеристики, настройка и работа обоих регуляторов должны быть взаимно согласованы. Степень взаимодействия между регуляторами зависит от характера их связи.

К особенностям систем замкнутого регулирования относится также то, что наличие двух регуляторов оказывает существенное влияние на условия устойчивости и характер переходных процессов. Поэтому для таких систем исследование динамики представляет собой более важную, но в то же время значительно более сложную задачу, чем для систем саморегулирования, которые обладают значительным запасом устойчивости.

21. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ (АРМ)

Развитие тепловозостроения привело к созданию большого числа разнообразных систем автоматического регулирования мощности двигатель-генератора в Советском Союзе и за границей. Многие из них основаны на совершенно различных принципах, другие сходны между собой. Для того чтобы выявить основные свойства различных систем и сопоставить их, необходимо прежде всего систематизировать их по главным признакам.

В ряде работ, посвященных тепловозным передачам [3], [4], [16], приведены варианты классификации систем автоматического регулирования генератора по таким признакам, как сочетание обратных связей, воздействующих на магнитный поток генератора; по характеристике регулятора (статический или астатический) или выполнению регулятора (электромашинное, аппаратное или смешанное регулирование). Такая классификация, будучи принципиально правильной, не является достаточно полной, так как не учитывает связи между системами регулирования теплового двигателя и генератора. Между тем характер указанной связи оказывает существенное влияние на выбор основной регулируемой величины, измеряемой регулятором генератора. От характера связи зависит также самый процесс регулирования генератора: совершается ли он при неизмен-

ной подаче топлива или она изменяется в процессе регулирования. Наконец, конструктивное выполнение регулятора генератора, при всем разнообразии возможных решений, также зависит от связи между системами регулирования.

Поэтому правильнее в основу подразделения систем положить именно характер связи между системами регулирования теплового двигателя и генератора. Дальнейшее подразделение проводится по характеру основной регулируемой величины и дополнительных регулирующих воздействий и по выполнению регуляторов двигателя и генератора.

По характеру связи между регуляторами системы можно разделить на три группы:

1) системы раздельного регулирования, в которых регулятор генератора не связан конструктивно или кинематически с регулятором теплового двигателя;

2) системы каскадного регулирования, в которых измеряемой величиной для регулятора генератора является положение исполнительного органа регулятора теплового двигателя (перемещение этого органа дает импульс для начала работы регулятора генератора) и

3) системы объединенного регулирования, в которых регулирование теплового двигателя и генератора осуществляется одним общим регулятором с двумя исполнительными органами для изменения подачи топлива и магнитного потока.

Для регулятора теплового двигателя регулируемой величиной во всех случаях является угловая скорость. В системах раздельного регулирования в качестве регулируемой величины регулятора генератора используется мощность генератора или угловая скорость. В системах каскадного регулирования регулятор генератора стремится сохранить постоянное положение исполнительного органа регулятора теплового двигателя. Следовательно, регулируемой величиной для него является подача топлива или определяемый ею крутящий момент теплового двигателя.

В системах объединенного регулирования измерительный орган является общим для регулирования теплового двигателя и генератора. Следовательно, регулируемой величиной для этих систем может быть только угловая скорость.

Как указывалось выше, для повышения экономичности работы силовой установки при частичных нагрузках необходимо одновременно с уменьшением угловой скорости уменьшать величину крутящего момента теплового двигателя, причем для разных типов тепловых двигателей оптимальное соотношение между угловой скоростью и крутящим моментом различно. Иногда предусматривается работа обоих регуляторов как при полной нагрузке, так и при частичной. В зависимости от характера связи между регуляторами, желательная характеристика $M_d = f(n)$ достигается изменением настройки регулятора теплового двигателя, регулятора генератора или обоих регуляторов одновременно. Нередко применяются системы, которые работают лишь при полной нагрузке и выключаются при частичных нагрузках.

Отсюда следует, что характер связи между регуляторами оказывает влияние на режим работы теплового двигателя при пониженной мощности.

Применяются системы, представляющие собой комбинацию замкнутой системы регулирования и одной из систем саморегулирования. При таком сочетании использование саморегулирования двигатель-генератора уменьшает требуемую мощность регулятора генератора и повышает качество регулирования, а введение регулятора генератора улучшает использование мощности теплового двигателя. В таких системах магнитный поток генератора (или его возбuditеля) изменяется не только в результате отклонения регулируемой величины, измеряемой регулятором, но и вследствие регулирующего воздействия в системе саморегулирования. В качестве такого регулирующего воздействия чаще всего используется ток I_g нагрузки генератора, но иногда используются также напряжение генератора U_g или возбuditеля U_v , скорость движения v и т. д. Нередко изменение магнитного потока в результате саморегулирования составляет главную часть всего рабочего диапазона изменения его. В этих случаях систему саморегулирования рассматривают как основную систему регулирования, а замкнутую систему — как дополнительное регулирование или корректирование по той или иной регулируемой величине (например, корректирование по угловой скорости). Однако степень использования мощности двигатель-генератора, характер процесса регулирования и в этих случаях определяются принципом работы регулятора генератора и его характеристиками. Поэтому при анализе качества регулирования замкнутой системы с саморегулированием целесообразно принимать величину, поддерживаемую регулятором как основную, а саморегулирование — как дополнительное регулирующее воздействие или как дополнительную обратную связь.

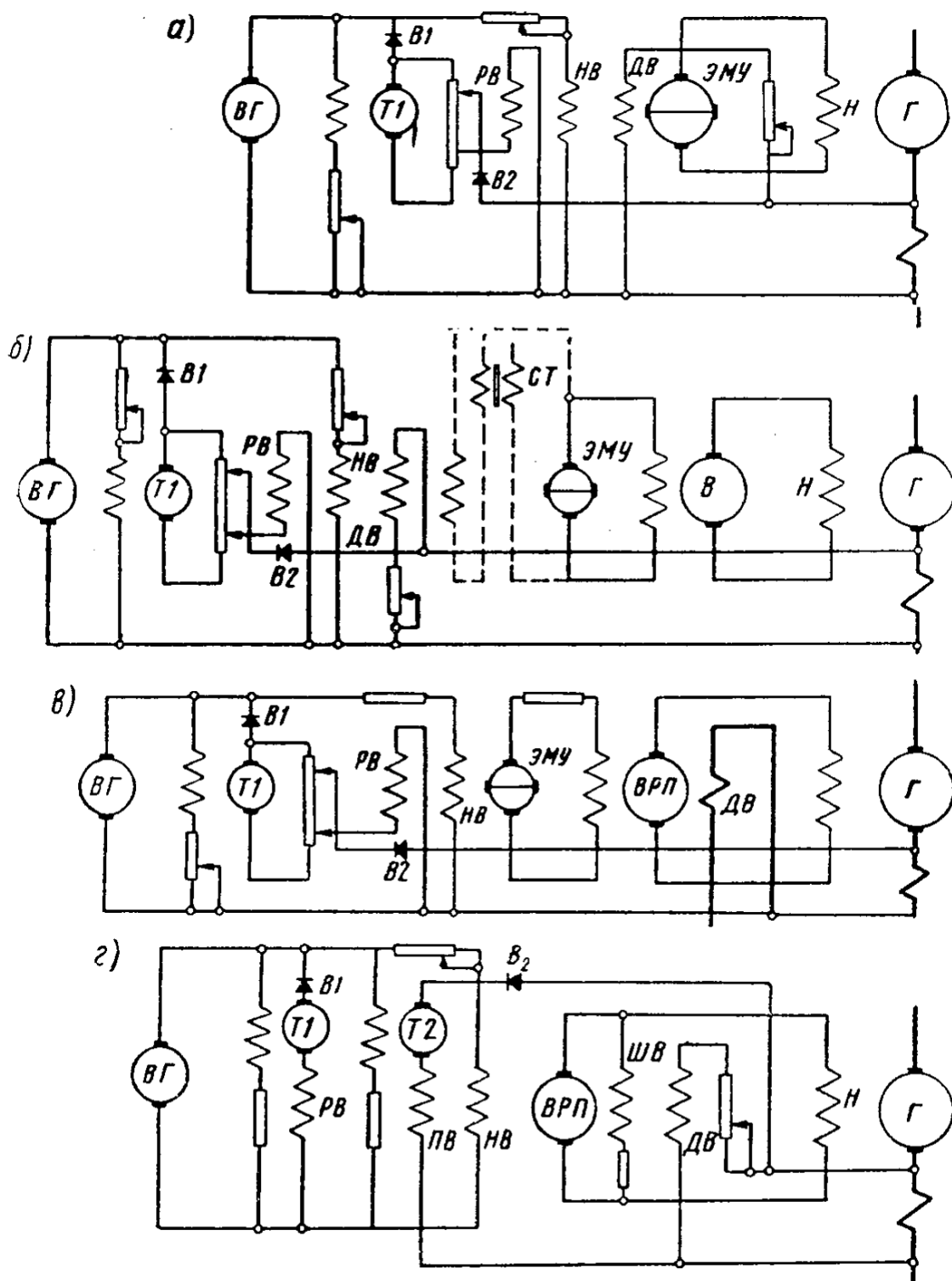
Некоторые замкнутые системы автоматического регулирования сочетают с себе регулирование мощности теплового двигателя с автоматическим регулированием тока генератора при пуске, что улучшает использование сцепного веса локомотива. Другие системы не обеспечивают регулирования пускового тока. Для улучшения пусковых характеристик иногда используется сочетание таких систем с системами саморегулирования, обеспечивающими выпуклые характеристики генератора, или добавляются отдельные схемы регулирования пускового тока.

Принципы действия различных схем автоматического регулирования описаны в литературе [16], [17].

22. СХЕМА ЭЛЕКТРОМАШИННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ТАХОГЕНЕРАТОРОМ

Предложенная автором схема (авторское свидетельство № 99650), называемая дальше для краткости «тахометрической», принадлежит к числу схем раздельного регулирования и была исследована на кафедре «Электрический транспорт» МЭИ в четырех вариан-

тах (фиг. 48): а) с электромашинным усилителем поперечного поля (ЭМУПП) в качестве возбудителя; б) с возбудителем обычного



Фиг. 48. Тахометрическая схема регулирования мощности и пускового тока:

а — с ЭМУПП в качестве возбудителя; б — с возбудителем обычного типа и ЭМУПП; в — с ВРП и ЭМУПП; г — с ВРП и двумя тахогенераторами.

типа и ЭМУПП (подвозбудителем); в) с возбудителем с расщепленными полюсами (ВРП) и электромашинным усилителем ЭМУПП в качестве подвозбудителя и г) с возбудителем с расщепленными полюсами и двумя тахогенераторами.

Во всех вариантах схема имеет два узла сравнения, из которых один служит для автоматического регулирования мощности двигатель-генератора, другой — для автоматического регулирования пускового тока генератора. Рассмотрим принцип действия схемы на примере варианта с двумя тахогенераторами (фиг. 48, г), примененного в тепловозах ТЭЗ.

Обмотка возбуждения Н генератора Г питается от возбудителя ВРП с радиально расщепленными полюсами (характеристики которого приведены на фиг. 40).

Обмотки НВ, ШВ и ДВ возбудителя используются для создания гиперболической внешней характеристики генератора, обмотки РВ и ПВ предназначены для автоматического регулирования мощности двигатель-генератора и пускового тока генератора.

Регулирующая обмотка РВ включена на разность напряжения тахогенератора Т1, пропорционального угловой скорости двигатель-генератора, и напряжения вспомогательного генератора ВГ, поддерживаемого постоянным с помощью регулятора напряжения. Вентиль В1 пропускает ток, когда э. д. с. E_{T1} тахогенератора Т1 выше напряжения $U_{вг}$ вспомогательного генератора. При этом регулирующая обмотка действует согласно с независимой.

Обмотка ПВ регулирования пускового тока включена на разность напряжения U_c пропорционального току генератора, и э. д. с. E_{T2} тахогенератора Т2, пропорционального угловой скорости двигатель-генератора. В частности, в тепловозе ТЭЗ напряжение U_c равно падению напряжения в обмотках возбуждения одной группы тяговых двигателей и обмотках дополнительных полюсов и компенсационной генератора. В цепь включен вентиль В2, пропускающий ток при $U_c > E_{T2}$. При этом обмотка ПВ действует навстречу независимой, т. е. уменьшает магнитный поток возбудителя.

Рассмотрим вначале работу узла регулирования мощности, приняв равным нулю ток в цепи регулирования пускового тока. Сопротивление в цепи независимой обмотки возбудителя установлено так, что без регулирующей обмотки тепловой двигатель недогружен. Сопротивление в цепи возбуждения тахогенератора Т1 отрегулировано таким образом, что при наибольшей угловой скорости, поддерживаемой регулятором теплового двигателя, ток в регулирующей обмотке достигает максимального значения. Это значение, соответствующее максимальному возбуждению возбудителя, сохраняется неизменным, пока момент генератора меньше свободного момента теплового двигателя при наибольшей подаче топлива. При этом действует регулятор теплового двигателя, изменяя подачу топлива. Когда при увеличении момента генератора шток регулятора достигает положения упора, регулятор двигателя перестает действовать и дальнейшее повышение момента вызывает снижение угловой скорости. При этом начинается действие регулятора генератора: резко уменьшается ток регулирующей обмотки и новое равновесие между моментами теплового двигателя и генератора восстанавливается при некотором снижении угловой скорости. Наоборот, уменьшение момента генератора или увеличение

свободного момента теплового двигателя (например, вследствие выключения части вспомогательной нагрузки) вызывает увеличение угловой скорости, результатом чего является увеличение момента генератора. Таким образом, схема поддерживает приблизительно постоянную угловую скорость путем изменения возбуждения возбудителя.

В схеме отсутствует регулятор генератора как самостоятельный аппарат и поэтому она может быть отнесена к системам саморегулирования. Однако по своим характеристикам и динамическим свойствам схема близка к замкнутым системам раздельного регулирования. Узел схемы, состоящий из тахогенератора Т1, вспомогательного генератора и регулирующей обмотки, может рассматриваться как регулятор прямого действия. В регуляторе имеется узел сравнения, состоящий из тахогенератора, измеряющего угловую скорость и являющегося измерительным органом, и вспомогательного генератора, напряжение которого определяет уровень угловой скорости, поддерживаемой регулирующим устройством, и который может рассматриваться как задающий орган. Исполнительным органом служит регулирующая обмотка возбуждения возбудителя, изменяющая магнитный поток возбудителя, являющийся регулируемым параметром.

Для цепи регулирующей обмотки справедливо равенство

$$E_{T1} = C_{T1} \Phi_{T1} n = U_{\text{сг}} + i_{pv} (R_{pv} + R_{T1}) + U_{\text{с1}} + U_{\text{щ1}} + L_{pv} \frac{di_{pv}}{dt} + M_{pнв} \frac{di_{нв}}{dt} \quad \text{в}, \quad (29)$$

- где R_{pv} — сопротивление регулирующей обмотки в ом;
 R_{T1} — сопротивление цепи якоря тахогенератора Т1 (вместе с соединительными проводами узла АРМ) в ом;
 $U_{\text{щ1}}$ — падение напряжения в вентиле В1 в в;
 $U_{\text{с1}}$ — падение напряжения на щетках тахогенератора Т1 в в;
 L_{pv} — коэффициент самоиндукции цепи регулирующей обмотки в генри;
 $M_{pнв}$ — коэффициент взаимоиндукции регулирующей обмотки относительно независимой обмотки в генри.

При установившемся режиме

$$n = \frac{U_{\text{сг}} + i_{pv} (R_{pv} + R_{T1}) + U_{\text{с1}} + U_{\text{щ1}}}{C_{T1} \Phi_{T1}} \quad \text{об/мин.} \quad (30)$$

Процесс регулирования начинается с отклонения угловой скорости, которое вызывает изменение тока в регулирующей обмотке. Установившееся значение тока регулирующей обмотки определяется соотношением моментов теплового двигателя и генератора. Если момент генератора M'_g по собственной характеристике его (без учета регулирующей обмотки) меньше момента M_d , развиваемого тепловым двигателем, то ток регулирующей обмотки достигает значения, при котором моменты равны. Следовательно, ток регулирующей обмотки $i_{pv} = f(M_d - M'_g)$.

В свою очередь, угловая скорость устанавливается в соответствии с равенством (30) в зависимости от тока регулирующей обмотки. С изменением M_δ или M'_δ изменяется i_{pv} , при этом изменяются падения напряжения в цепи регулирующей обмотки и, следовательно, изменяется угловая скорость двигатель-генератора. Таким образом, регулирование угловой скорости является статическим. Как видно из равенства (30), отклонение угловой скорости зависит от величины падений напряжения в цепи регулирующей обмотки.

Из равенства (30) также следует, что угловая скорость зависит от величин $U_{\delta 2}$ и Φ_{T1} . При возбуждении тахогенератора от постоянных магнитов магнитный поток его постоянен (если пренебречь влиянием реакции якоря). Следовательно, отклонение напряжения вспомогательного генератора вызывает соответствующее ему отклонение угловой скорости двигатель-генератора и увеличивает общую неравномерность системы регулирования. При выполнении тахогенератора с обмоткой возбуждения, получающей питание от вспомогательного генератора (фиг. 48, з), магнитный поток тахогенератора находится в прямой зависимости от напряжения $U_{\delta 2}$ и при ненасыщенной магнитной цепи тахогенератора пропорционален $U_{\delta 2}$. В этом случае изменение напряжения вспомогательного генератора может оказывать лишь незначительное влияние на точность регулирования. При этом, однако, необходимо принять меры к тому, чтобы изменение температуры обмотки возбуждения не приводило к существенному изменению напряжения тахогенератора. Это может быть достигнуто, например, путем включения большого добавочного сопротивления или выполнения обмотки из материала с низким температурным коэффициентом.

Принимая постоянными напряжение вспомогательного генератора и ток возбуждения тахогенератора, из уравнения (29) получим дифференциальное уравнение регулятора генератора в безразмерных отклонениях, которое после преобразований приводится к форме

$$(T_{pv} p + 1) \bar{i}_{pv} = k_{pv} (\bar{n} + \bar{\Phi}_{T1}) - T_{pnv} p \bar{i}_{nv}, \quad (31)$$

где

$$T_{pv} = \frac{L_{pv}}{R_{pv} + R_{T1} + \frac{dU_{\delta 1}}{di_{pv}} + \frac{dU_{\omega 1}}{di_{pv}}} = \frac{L_{pv}}{R'_{pv}}; \quad (32)$$

$$T_{pnv} = \frac{M_{pnv} i_{nvH}}{R'_{pv} (i_{pv \max} - i_{pv \min})}; \quad (33)$$

$$k_{pv} = \frac{E_{T1H}}{R'_{pv} (i_{pv \max} - i_{pv \min})}; \quad (34)$$

$$\bar{i}_{pv} = \frac{\Delta i_{pv}}{i_{pv \max} - i_{pv \min}};$$

$$R'_{pv} = R_{pv} + R_{T1} + \frac{dU_{\delta 1}}{di_{pv}} + \frac{dU_{\omega 1}}{di_{pv}}.$$

Безразмерная величина $\bar{i}_{pв}$ является отношением отклонения тока $i_{pв}$ регулирующей обмотки к разности предельных значений $i_{pв\max}$ и $i_{pв\min}$, требуемых по условиям работы двигатель-генератора. Величина Φ_{T1} — это отклонение магнитного потока тахогенератора, отнесенное к некоторому значению потока, принятому за номинальное и соответствующему номинальному же значению э. д. с. тахогенератора.

Производные $\frac{dU_{с1}}{di_{pв}}$ и $\frac{dU_{щ1}}{di_{pв}}$ должны быть определены по характеристикам $U_{с1} = f(i_{pв})$ и $U_{щ1} = f(i_{pв})$ для установившегося режима работы.

В соответствии с равенством (31) статическое отклонение угловой скорости (статическая ошибка регулятора) равно

$$\bar{n} = \frac{\bar{i}_{pв}}{k_{pв}} - \Phi_{T1}. \quad (35)$$

Для максимального отклонения тока регулирующей обмотки, равного $i_{pв\max} - i_{pв\min}$, относительное отклонение равно

$$\bar{i}_{pв\max} = \frac{i_{pв\max} - i_{pв\min}}{i_{pв\max} - i_{pв\min}} = 1.$$

Статизм системы регулирования определяется величиной

$$\begin{aligned} \delta = \bar{n}_{\max} &= \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_H} = \frac{1}{k_{pв}} - \Phi_{T1\max} = \\ &= \frac{R'_{pв} (i_{pв\max} - i_{pв\min})}{E_{T1H}} - \Phi_{T1\max}, \end{aligned} \quad (36)$$

где $\Phi_{T1\max}$ — относительное отклонение магнитного потока тахогенератора при изменении тока регулирующей обмотки в пределах от $i_{pв\min}$ до $i_{pв\max}$.

При заданном значении E_{T1H} , определяемом напряжением вспомогательного генератора, статизм регулятора уменьшается с уменьшением величин R_{T1} , $R_{pв}$, $\frac{dU_{с1}}{di_{pв}}$, $\frac{dU_{щ1}}{di_{pв}}$, а также с уменьшением абсолютного значения максимального отклонения тока $i_{pв}$. Отклонение потока тахогенератора при изменении $i_{pв}$ определяется влиянием реакции якоря. Так как с увеличением $i_{pв}$ размагничивающее действие поперечной реакции увеличивается, то отклонение Φ_{T1} (при нейтральном положении щеток) является отрицательным и статизм регулятора, вследствие реакции якоря, увеличивается. Статизм регулятора может быть снижен, если магнитный поток тахогенератора будет увеличиваться с увеличением тока. Это достигается добавлением последовательной обмотки или сдвигом щеток. Последний способ является предпочтительным, так как он дает возможность плавной настройки характеристики генератора.

Отклонение Φ_{T1} может быть вызвано также изменением остаточного магнитного потока в магнитной цепи тахогенератора. Такое отклонение равнозначно самопроизвольному изменению настройки

регулятора. Поэтому должны быть приняты меры к снижению остаточного магнетизма тахогенератора.

Вентиль В1 введен в схему с целью защиты элементов цепи регулирующей обмотки от перегрузки при уменьшении угловой скорости двигатель-генератора.

Из равенства (36) следует, что для уменьшения статизма системы регулирования следует всемерно уменьшать величину разности $i_{ps \max} - i_{ps \min}$ (при заданном сопротивлении R'_{ps}). Применение возбуждителя, обеспечивающего гиперболическую характеристику генератора, существенно облегчает эту задачу. При этом изменение возбуждения возбуждителя вследствие изменения тока нагрузки осуществляется автоматически по характеристике возбуждителя. На долю тахометрической схемы остается лишь компенсация неточности характеристики возбуждителя, гистерезиса, влияния температуры обмоток, вспомогательной нагрузки и других подобных факторов. В результате диапазон изменения тока регулирующей обмотки получается в несколько раз меньше, чем при возбуждателе обычного типа.

Вторым возможным средством уменьшения статизма является увеличение коэффициента усиления системы

$$k_y = \frac{\Delta A W_n}{\Delta A W_{ps}}. \quad (37)$$

Чем больше этот коэффициент, тем меньшее отклонение н. с. регулирующей обмотки необходимо для заданного изменения н. с. генератора.

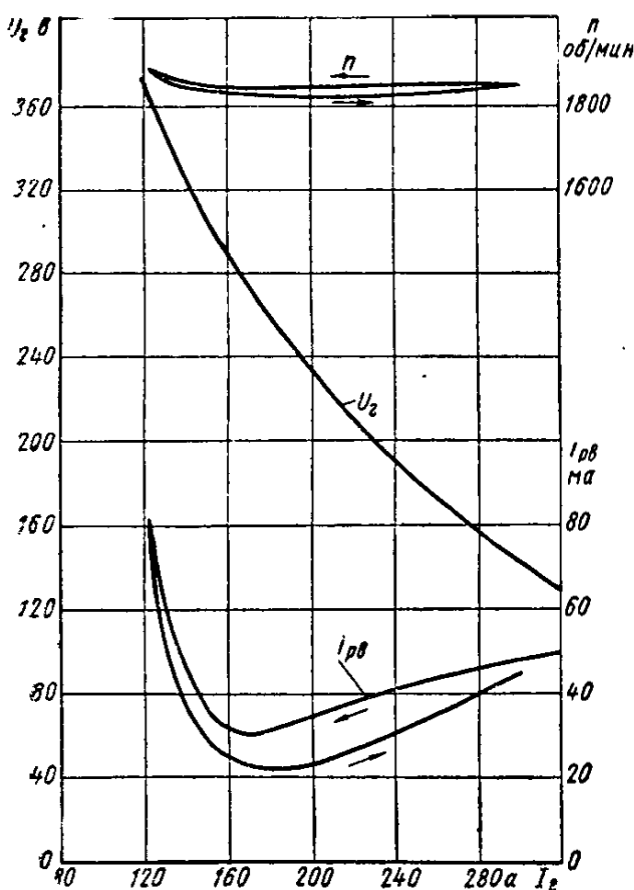
Коэффициент усиления может быть увеличен различными путями. В схеме фиг. 48, а в качестве возбуждителя использован электромашинный усилитель поперечного поля, коэффициент усиления которого во много раз больше коэффициента усиления возбуждителя с расщепленными полюсами. Схема фиг. 48, б имеет более высокий коэффициент усиления вследствие каскадного включения ЭМУПП и возбуждителя. Статизм в схеме фиг. 48, в дополнительно снижается из-за использования возбуждителя с расщепленными полюсами. Возможно также использование магнитного усилителя.

В схемах фиг. 48, а—г крутящий момент теплового двигателя остается практически постоянным, а отклонение угловой скорости определяется характеристиками системы регулирования мощности. Поэтому наиболее объективным показателем точности регулирования схемы является именно отклонение угловой скорости. Изменение настройки узла АРМ производится изменением возбуждения тахогенератора Т1: при увеличении возбуждения уменьшается угловая скорость, при которой приходит в действие узел АРМ. Узел АРМ может работать при нескольких различных угловых скоростях двигатель-генератора. Для этой цели необходимо одновременно с изменением настройки регулятора дизеля изменять настройку тахогенератора Т1. Однако в этом случае тепловой двигатель будет работать с полной подачей топлива при пониженных угловых скоростях.

Поэтому целесообразно использовать узел АРМ лишь при максимальной угловой скорости, когда важно полное использование мощности. При пониженных угловых скоростях крутящий момент теплового двигателя изменяется по закону, определяемому характеристиками системы саморегулирования двигатель-генератора (см. фиг. 44).

На кафедре «Электрический транспорт» МЭИ были проведены под руководством автора исследования схем фиг. 48, а—г с дизелем ЯАЗ-204 мощностью 112 л. с. и генератором ДК-505А при нагрузке на реостат. В качестве возбудителя использовался возбудитель тепловоза ТЭ2, переделанный в соответствии с характеристиками генератора, и электромашинный усилитель ЭМУ-2,5.

В схеме фиг. 48, а обмотка ДВ ЭМУПП для уменьшения статизма питалась током, пропорциональным току нагрузки генератора. Одна из полученных характеристик дизель-генератора приведена на фиг. 49. Угловая скорость



Фиг. 49. Характеристики дизель-генератора, полученные при лабораторном исследовании схемы фиг. 48, а.

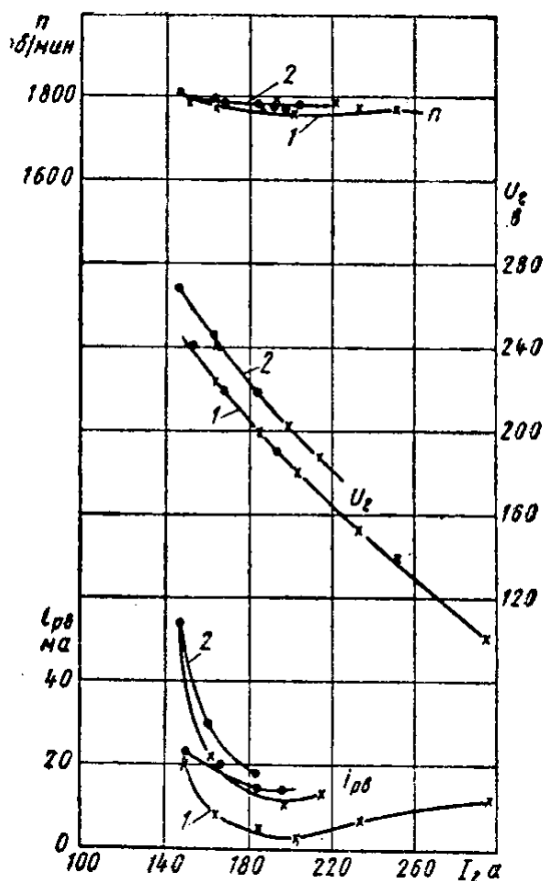
показана на фиг. 50. Кривая $i_{pв}$ имеет более широкую петлю, чем в фиг. 49, так как, кроме магнитного гистерезиса ЭМУПП, оказывает влияние магнитный гистерезис возбудителя. Отклонение угловой скорости при изменении тока от 160 до 320 а также составляет около 1,8%. Разброс точек в кривых значительно больше, чем на фиг. 49, так как в схеме наблюдались колебания. Точность регули-

поддерживается приблизительно постоянной в широком диапазоне изменения нагрузки. Ток $i_{pв}$ регулирующей обмотки изменяется вследствие того, что характеристика генератора при возбуждении от ЭМУПП без регулировочной обмотки является выпуклой, а также из-за влияния гистерезиса ЭМУПП. Общее отклонение угловой скорости составляет 1,8% при $I_g = 160 \div 320$ а (резкое увеличение $i_{pв}$ при $I_g < 160$ а обусловлено насыщением магнитной цепи генератора и не зависит от работы схемы).

Схема фиг. 48, б отличается от предыдущей только введением промежуточного возбудителя В, для которого использован возбудитель тепловоза ТЭ2 с замкнутой накоротко дифференциальной обмоткой. Воздействие по току нагрузки осуществляется, как в предыдущей схеме, дифференциальной обмоткой ДВ ЭМУПП. Характеристика дизель-генератора

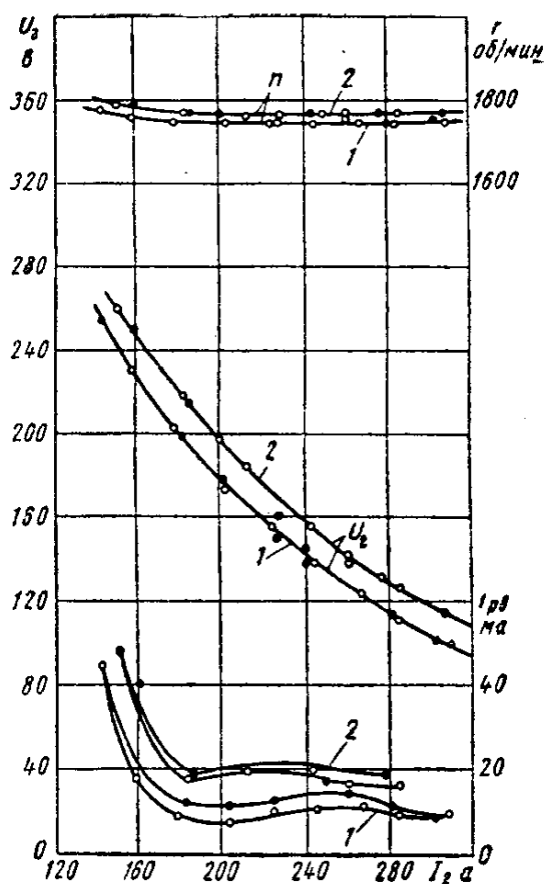
рования, несмотря на увеличение коэффициента усиления, практически такая же, как при схеме фиг. 48, что объясняется увеличением влияния гистерезиса и наличием колебаний в схеме.

Изменения вспомогательной нагрузки имитировались в опытах увеличением подачи топлива. При этом ток i_{pv} увеличивается и угловая скорость немного растет (примерно на 1%). Опыт проводился при токах $I_2 < 220$ а, так как при больших токах возникали незатухающие колебания большой амплитуды.



Фиг. 50. Характеристики дизель-генератора, полученные при лабораторном исследовании схемы фиг. 48, б:

1 — при начальной подаче топлива;
2 — при увеличенной подаче топлива.

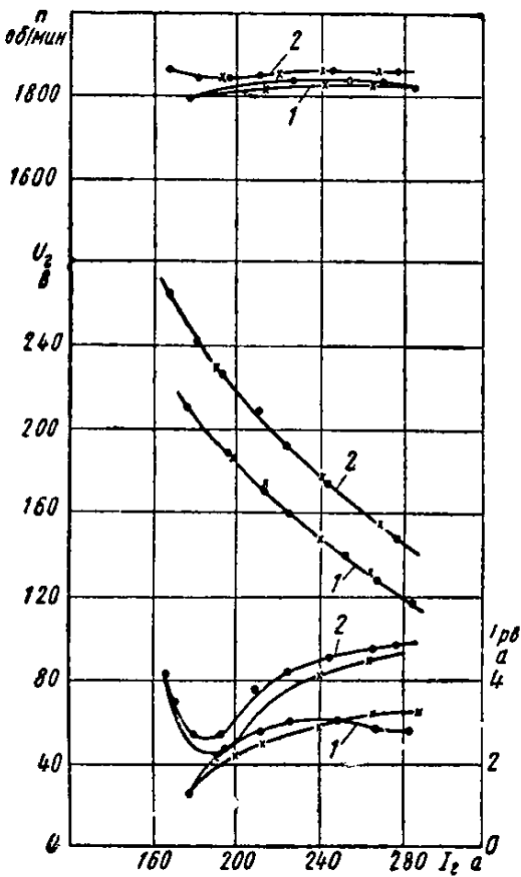


Фиг. 51. Характеристики дизель-генератора, полученные при лабораторном исследовании схемы фиг. 48, в:

1 — при начальной подаче топлива;
2 — при увеличенной подаче топлива.

При исследовании схемы фиг. 48, в дифференциальная обмотка ЭМУПП была выключена, а дифференциальная обмотка ДВ возбуждителя включена в цепь нагрузки генератора. Характеристики дизель-генератора для этого случая приведены на фиг. 51. Ток i_{pv} в пределах $I_2 = 160 \div 320$ а изменяется значительно меньше, чем в предыдущих схемах, что является результатом приближения внешней характеристики генератора (при включенной обмотке РВ) к кривой постоянной мощности. Это происходит в результате действия ВРП и уменьшения влияния гистерезиса ЭМУПП из-за выключения дифференциальной обмотки в нем. Отклонение угловой скорости в тех же пределах изменения тока нагрузки составляет 0,6%. В схеме также наблюдались колебания тока i_{pv} , но с мень-

шей амплитудой, а колебания напряжения и угловой скорости были незаметны. При увеличении подачи топлива ток i_{pv} увеличивается и угловая скорость повышается (примерно на 1%).

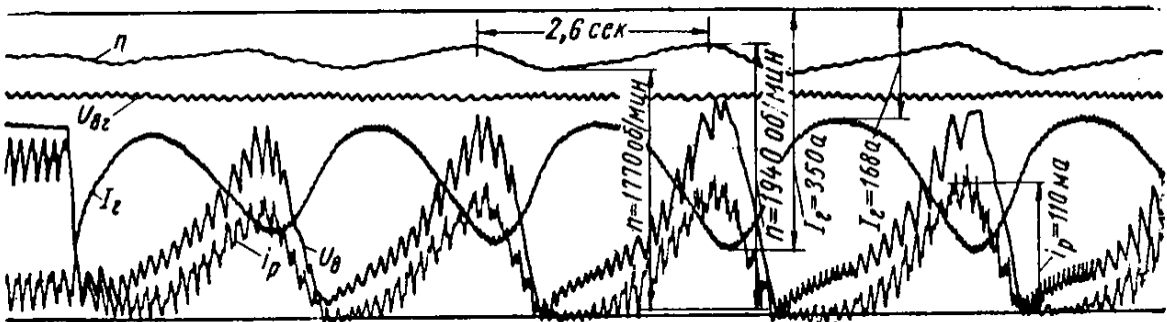


Фиг. 52. Характеристики дизель-генератора, полученные при лабораторном исследовании схемы фиг. 48, г :
1 — при начальной подаче топлива;
2 — при увеличенной подаче топлива.

На фиг. 52 приведены характеристики двигатель-генератора для схемы фиг. 48, г, в которой узел сравнения включен в цепь регулирующей обмотки РВ возбудителя с расщепленными полюсами. При переборке возбудителя для установки новых катушек полюсов (с обмотками РВ, ПВ и СВ) несколько изменилась характеристика возбудителя, что исказило внешнюю характеристику генератора. Поэтому ток i_{pv} относительно больше изменяется, чем в схеме фиг. 48, в. По этой причине и вследствие меньшего коэффициента усиления схемы отклонение угловой скорости при данной подаче топлива увеличилось (примерно до 2,5%). В большей степени изменяется также угловая скорость при изменении подачи топлива.

Указанные выше характеристики получены при плавном изменении нагрузки. При этом схемы работали устойчиво, за исключением схемы фиг. 48, в, в которой нередко возникали незатухающие колебания. При резком изменении тока незатухающие колебания возникали и при других схемах.

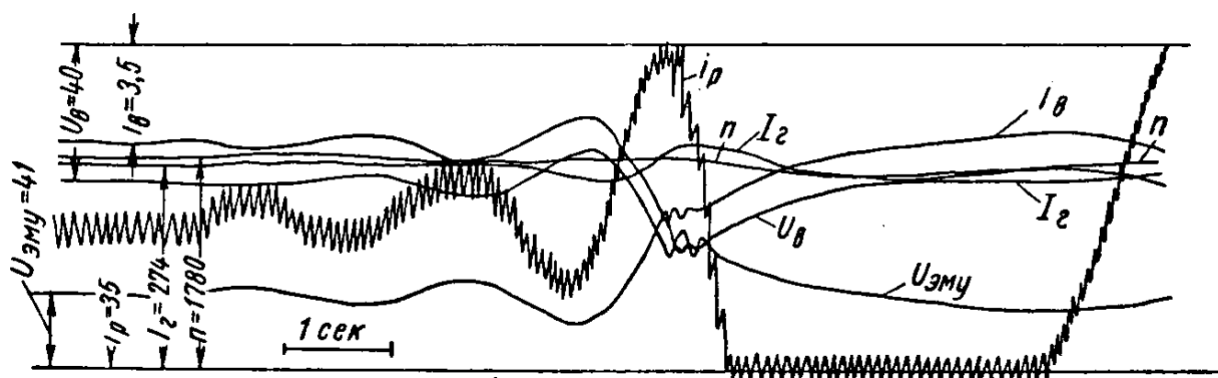
На фиг. 53 приведена осциллограмма, снятая при исследовании схемы фиг. 48, а после толчка тока с 172 до 350 а. В схеме возникли незатухающие колебания с большими амплитудами и периодом $T = 2,6$ сек. При меньших толчках тока колебания затухали через 6—10 периодов.



Фиг. 53. Осциллограмма незатухающих колебаний в схеме фиг. 48, а при увеличении тока с 172 до 350 а.

Схема фиг. 48, б при больших токах нагрузки работала устойчиво лишь при включении стабилизирующего трансформатора (пока-

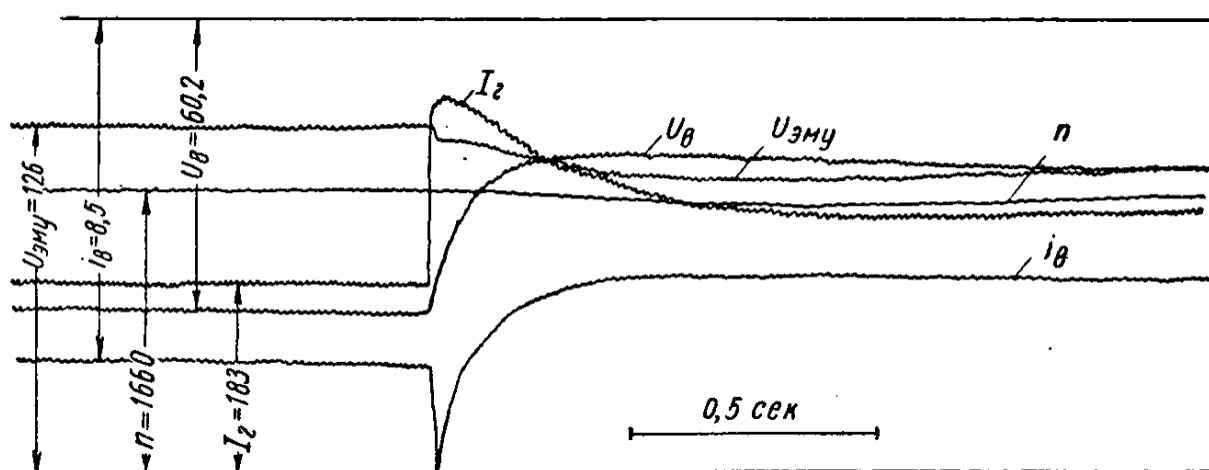
занного на фиг. 48, б пунктиром). На фиг. 54 показан переходный процесс после отключения стабилизирующего трансформатора (без изменения режима работы дизель-генератора). В схеме возникают колебания с увеличивающейся амплитудой. После повторного включения стабилизирующего трансформатора, показанного на осциллограмме, амплитуды колебаний уменьшаются и они прекращаются через 2—3 цикла.



Фиг. 54. Осциллограмма процессов после выключения и включения стабилизирующего трансформатора в схеме фиг. 48, б.

На фиг. 55 приведен переходный процесс в схеме фиг. 48, в после толчка тока с 183 до 360 а. Процесс протекает монотонно.

Следует отметить, что по проведенным аналитическим расчетам условия устойчивости для схем фиг. 48, б и в оказались практически одинаковыми. Между тем, наблюдения за работой обеих схем и



Фиг. 55. Осциллограмма скачкообразного изменения тока генератора в схеме фиг. 48, в.

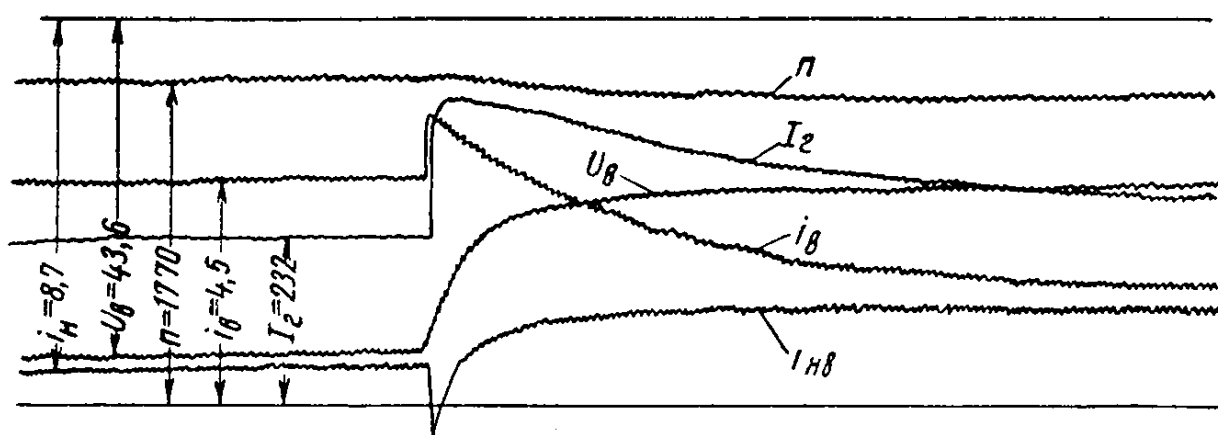
ряд снятых осциллограмм показывают, что вторая схема работает значительно устойчивее, хотя при некоторых толчках тока возникали колебания. Физически это объясняется тем, что, как видно из фиг. 51, при изменении тока нагрузки, установившийся ток i_{p0} меняется очень мало.

Это значит, что изменение нагрузки вызывает лишь незначительное отклонение установившегося момента генератора дизеля благо-

даря гиперболической характеристике возбудителя. В нелинейных системах устойчивость зависит не только от параметров системы, но и от величины возмущающего воздействия (т. е. отклонения режима работы). В схеме фиг. 48, а установившееся отклонение мало, в схеме же фиг. 48, б, где возбудитель не имеет гиперболической характеристики, отклонение момента генератора при изменении нагрузки значительно больше.

В линейной системе условия устойчивости не зависят от величины возмущающего воздействия, и это обстоятельство не может быть учтено при расчете по линейным уравнениям. Кроме того, в линейных уравнениях не учтены нелинейность характеристики возбудителя и влияние гистерезиса его магнитной цепи. Поэтому в данном случае расчеты по линейным уравнениям не обеспечивают надежных результатов. Опыты показали, что уменьшение статизма регулирования понижает запас устойчивости. Указанные выше значения статизма (1—2%) близки к предельным по устойчивости.

На фиг. 56 приведен переходный процесс в схеме фиг. 48, а после толчка тока с 232 до 418 а. Переходный процесс совершался без колебаний. Наблюдения за работой схемы и осциллограммы показывают, что в этой схеме колебания не возникали при любых нарушениях режима работы.



Фиг. 56. Осциллограмма скачкообразного изменения тока генератора в схеме фиг. 48, а.

Рассмотрим теперь принцип автоматического регулирования пускового тока на примере схемы фиг. 48, а.

Узел регулирования пускового тока приходит в действие, когда входное напряжение U_c становится больше э. д. с. E_{T2} тахогенератора Т2 (фиг. 48, а). Возбуждение тахогенератора Т2 устанавливается так, чтобы при номинальной угловой скорости двигатель-генератора э. д. с. тахогенератора равнялась входному напряжению U_c при токе тяговых двигателей, близком к предельному по условиям сцепления колес с рельсами или коммутации генератора.

При токе силовой цепи, меньшем тока отсечки, в цепи тахогенератора Т2 протекает незначительный ток, равный обратному току вентиля В2. При превышении тока отсечки появляется ток $i_{нв}$ в обмотке ПВ.

При установившемся режиме для цепи обмотки ПВ справедливо уравнение

$$U_c = I_c R_c = E_{T2} + U_{в2} + U_{щ2} + i_{нв} (R_{нв} + R_{T2}) \text{ в}, \quad (38)$$

где R_c — сопротивление участка силовой цепи в ом, с которого снимается напряжение U_c ;

$U_{в2}$ и $U_{щ2}$ — падение напряжения в вентиле В2 и на щетках Т2 в в;

$R_{нв}$ — сопротивление обмотки ПВ (вместе с соединительными проводами) в ом;

R_{T2} — сопротивление цепи якоря Т2 в ом.

При увеличении U_c растет ток $i_{нв}$, что вызывает уменьшение напряжения возбудителя и напряжения генератора.

Ток в обмотке ПВ достигает максимального значения в начале пуска поезда с остановки, когда э. д. с. тяговых двигателей равна нулю и напряжение генератора равно падению напряжения в силовой цепи. В процессе пуска поезда ток генератора уменьшается, вызывает снижение тока $i_{нв}$ и увеличение напряжения генератора. При $i_{нв} = 0$ размагничивающее действие обмотки ПВ прекращается, что соответствует выходу на характеристику полной мощности двигатель-генератора. Желательно, чтобы сила тяги в процессе пуска поддерживалась приблизительно постоянной, для чего необходимо сохранение постоянного значения тока генератора. Точное выполнение этого условия затрудняется из-за того, что для повышения напряжения генератора требуется уменьшение тока $i_{нв}$ и, следовательно, члены правой части равенства уменьшаются.

Для уменьшения отклонения тока генератора при пуске необходимо, чтобы отклонения переменных членов правой части равенства (38) были минимальными. Элементы цепи должны выполняться с минимальным сопротивлением. Отклонение тока $i_{нв}$ может быть уменьшено путем увеличения коэффициента усиления системы возбуждения $k'_y = \frac{\Delta A W_n}{\Delta A W_{нв}}$.

Увеличение сопротивления R_c и E_{T2} уменьшает относительное влияние отклонения переменных членов правой части и отклонение пускового тока.

Наконец, возможна компенсация изменения падений напряжения в цепи АРП обратным по знаку изменением э. д. с. тахогенератора Т2. Это может быть осуществлено путем сдвига щеток или добавления последовательной обмотки возбуждения, действующей навстречу независимой, либо комбинацией обоих методов.

Особенностью данной схемы является автоматическое изменение тока отсечки при изменении угловой скорости двигатель-генератора без всяких переключений в схеме. Э. д. с. тахогенератора изменяется пропорционально угловой скорости, и ток отсечки, следовательно, также пропорционален угловой скорости. Поэтому при повороте рукоятки контроллера одновременно с увеличением мощности тепло-

вого двигателя растет пусковой ток и ускорение, устанавливающиеся в результате работы узла АРП.

Статизм регулирования с понижением угловой скорости возрастает в связи с относительным увеличением влияния переменных членов. Поэтому пусковые характеристики генератора с понижением угловой скорости делаются более пологими.

Сопоставление результатов испытаний вариантов схемы (фиг. 48) показало, что вариант фиг. 48, *г* является наиболее простым и обеспечивает наибольшую устойчивость работы. Подробные исследования электромашинного усилителя с поперечным полем показали нестабильность его характеристик вследствие большой величины остаточного магнетизма в направлении продольного и поперечного поля и его зависимости от предшествующего режима. Поэтому точность регулирования с учетом отклонений характеристик оказывается приблизительно одинаковой во всех схемах.

Схема фиг. 48, *г* и модификация схемы фиг. 48, *в* были смонтированы по проекту ХЭТЗ—МЭИ на секциях тепловоза ТЭ2-253 и испытаны в 1953 г. ЦНИИ МПС совместно с ХЭТЗ и МЭИ. На этом же тепловозе были испытаны также тахометрическая схема с магнитным усилителем, разработанная Н. В. Гороховым, С. М. Доманицким и К. И. Рудой, и схема с контактно-реостатным регулятором мощности, разработанная Т. Н. Хохловым и Е. В. Платоновым. Результаты испытаний опубликованы в Трудах ЦНИИ [10], и ниже приводятся лишь общие выводы.

Во всех схемах регулирование мощности в зависимости от тока нагрузки обеспечивалось характеристикой возбудителя с расщепленными полюсами. Узел автоматического регулирования мощности обеспечивал использование мощности дизеля при изменении температуры обмоток, мощности вспомогательных устройств и т. д. Схема с ЭМУПП и ВРП оказалась неудовлетворительной по точности регулирования. Остальные схемы показали удовлетворительную точность регулирования, устойчивую работу и благоприятные переходные процессы как при реостатных испытаниях, так и при движении с поездом. Точность регулирования схемы с регулятором мощности оказалась выше остальных и составила около 1%. Схема работает в колебательном режиме с малой амплитудой. Максимальное отклонение угловой скорости в схеме с двумя тахогенераторами достигло 3,4% и в схеме с магнитным усилителем 5%. Узел регулирования пускового тока в схеме с двумя тахогенераторами и в схеме с магнитным усилителем работал удовлетворительно, но крутизна характеристик генератора недостаточна. Схема с регулятором мощности не имеет узла регулирования пускового тока.

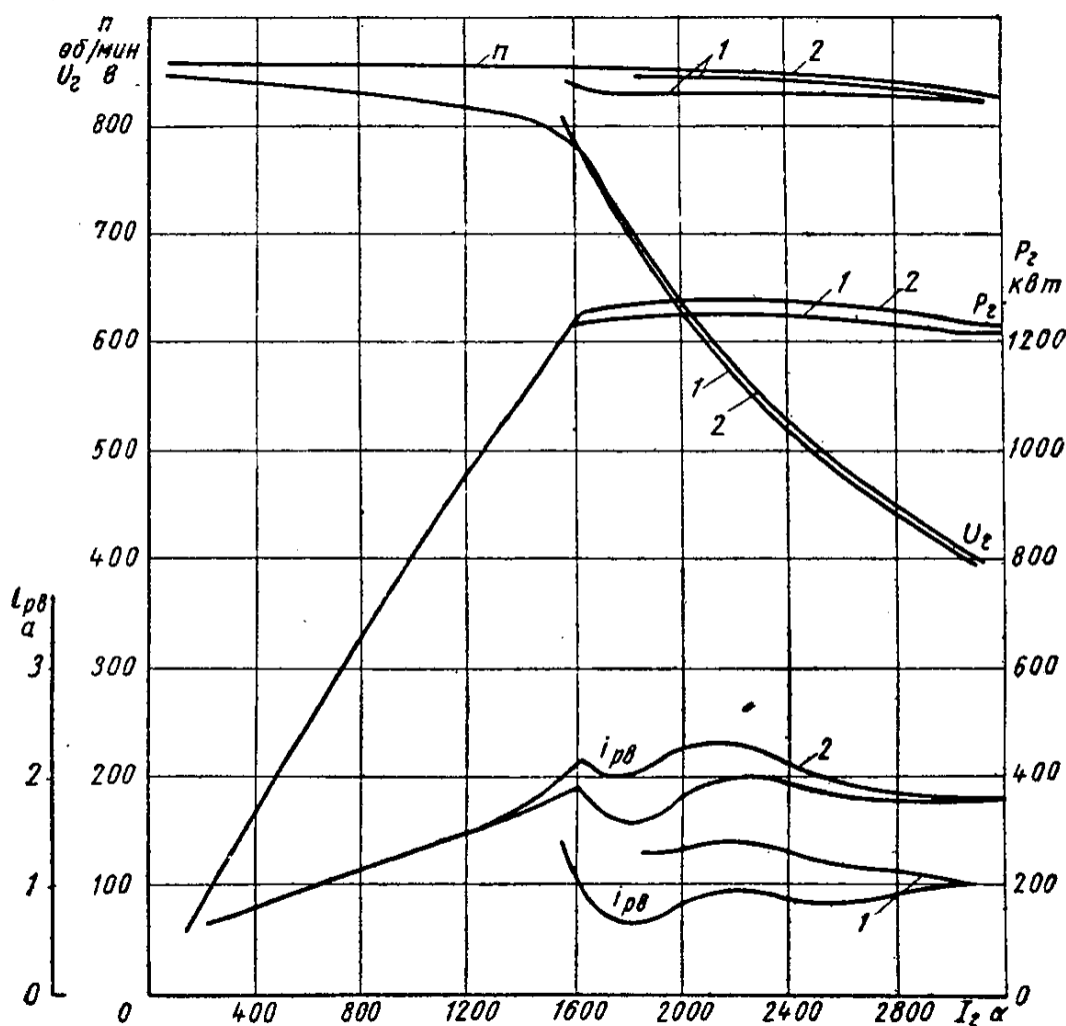
Регулятор мощности может быть легко установлен на готовом тепловозе. Он был рекомендован для установки на эксплуатируемых тепловозах ТЭ1 и ТЭ2. Две другие схемы рекомендованы для применения на новых тепловозах. Испытания выявили возможности дальнейшего улучшения их работы.

Проект схемы тепловоза ТЭ3 с использованием автоматического регулирования по варианту фиг. 48, *г* был разработан ХЭТЗ и МЭИ.

В 1955 г. опытный тепловоз ТЭЗ-002 был испытан ЦНИИ МПС совместно с Харьковским заводом МТрМ, ХЭТЗ и МЭИ.

На фиг. 57 приведены характеристики дизель-генератора тепловоза ТЭЗ с включенным узлом регулирования мощности при холодной ($t_{cp} = 22^\circ \text{C}$) и нагретой ($t_{cp} = 88^\circ \text{C}$) обмотке возбуждения генератора. С целью создания более тяжелых условий работы для узла регулирования в первом случае вентилятор холодильника работал при полной мощности (летний режим), во втором — при мощности, меньшей на 55 л. с. (зимний режим).

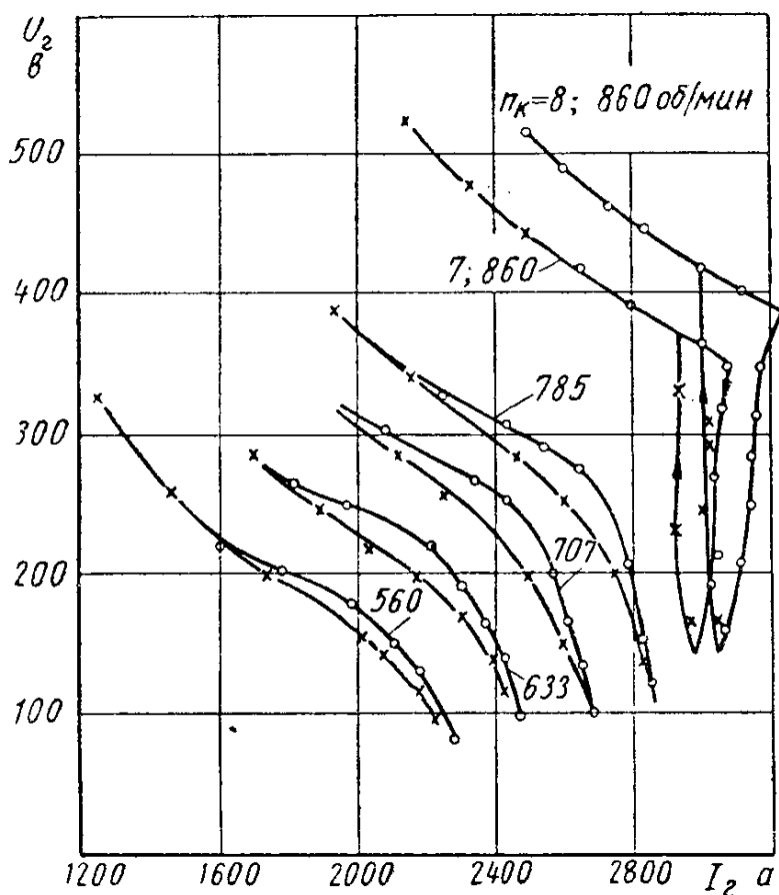
Максимальное отклонение угловой скорости с учетом изменения температуры и вспомогательной мощности в пределах тока $I_z = 1500 \div 3000$ а составило около 3%.



фиг. 57. Характеристики дизель-генератора тепловоза ТЭЗ с включенным узлом регулирования мощности для различных температур обмотки возбуждения генератора: 1 — $t_{нз} = 22^\circ \text{C}$, вентилятор на зимнем режиме; 2 — $t_{нз} = 88^\circ \text{C}$, вентилятор на летнем режиме.

На фиг. 58 приведены характеристики генератора при действии узла автоматического регулирования пускового тока на различных положениях контроллера управления (на опытном тепловозе контроллер, как указывалось, имеет 8 положений). При 860 об/мин (7-е и 8-е положения контроллера) и включенном узле АРМ ток генера-

тора поддерживается приблизительно постоянным до полной мощности дизеля. При меньших угловых скоростях пусковой ток снижается и характеристика становится более пологой.



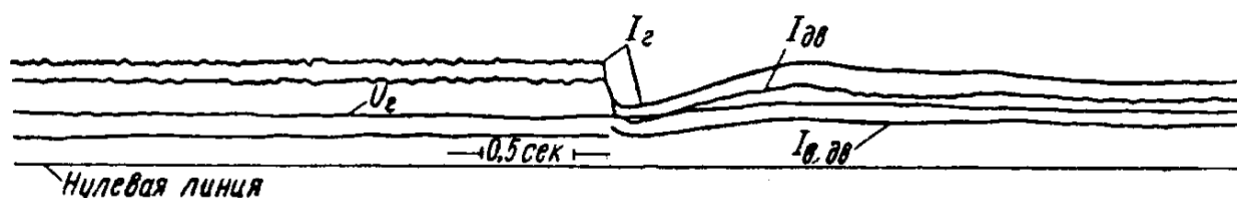
Фиг. 58. Характеристики генератора тепловоза ТЭЗ при автоматическом регулировании пускового тока и включенном узле регулирования мощности для различных угловых скоростей дизель-генератора.

приблизительно постоянным, пока ток i_{nv} не снижается до величины, близкой к нулю. При торможении снижение скорости вызывает увеличение тока I_2 , которое практически прекращается в результате увеличения тока i_{nv} .

Схема работыала при всех режимах устойчиво. На фиг. 59 показан переходный процесс (при переходе с ослабленного поля тяговых двигателей на полное поле), снятый осциллографом во время движения поезда при полной мощности дизеля. Несмотря на большой толчок тока, режим установился практически без колебаний.

Действие узла регулирования пускового тока показано на фиг. 60 при пуске поезда и на фиг. 61 — при торможении поезда.

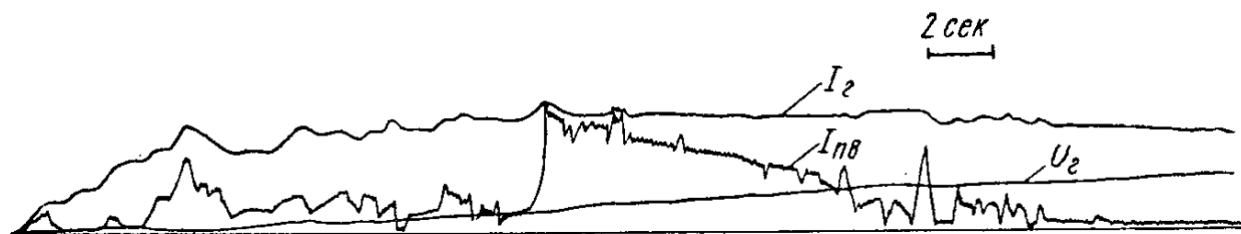
При пуске ток i_{nv} достигает максимального значения при установке рукоятки контроллера на 7-е положение, после чего уменьшается по мере увеличения скорости поезда. Ток I_2 поддерживается



Фиг. 59. Переходный процесс при выключении контакторов, шунтирующих обмотки возбуждения тяговых двигателей тепловоза ТЭЗ.

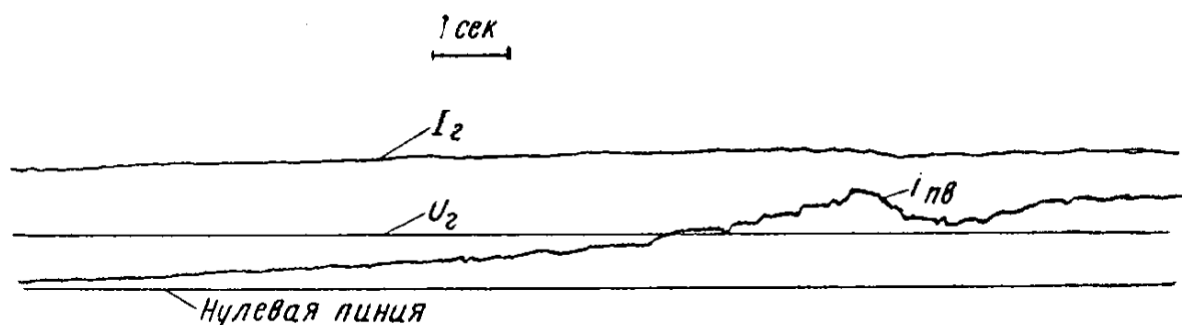
В 1956 г. ЦНИИ МПС совместно с ХЭТЗ и МЭИ вновь проводили испытания схемы автоматического регулирования двигатель-генератора на тепловозе ТЭЗ-003. Испытания в основном подтвердили результаты опытов 1955 г. Вместе с тем были уточнены факторы, влияющие на работу узлов автоматического регулирования.

Проверка работы узла регулирования мощности при различных настройках внешней характеристики тахогенератора Т1 путем поворота щеток показала существенное влияние внешней характеристики тахогенератора на статизм и устойчивость работы схемы. Поворот щеток против направления вращения снижает статизм регулирования, но при возрастающей внешней характеристике тахогенератора (когда напряжение увеличивается с увеличением тока) в схеме возникают незатухающие колебания с значительными амплитудами.



Фиг. 60. Изменение тока I_2 и напряжение U_2 генератора и тока $I_{пв}$ в обмотке ПВ возбuditеля при пуске поезда.

При испытаниях наблюдалось самопроизвольное изменение настройки узла регулирования мощности. Исследования показали, что оно является результатом изменения остаточного магнетизма



Фиг. 61. Изменение тока I_2 и напряжения U_2 генератора и тока $I_{пв}$ в обмотке ПВ возбuditеля при торможении поезда.

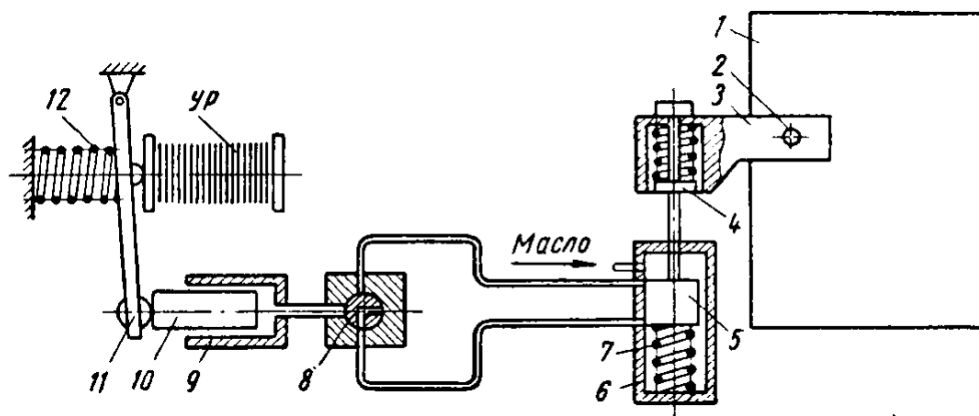
в магнитной цепи тахогенератора. В тепловозе ТЭЗ-003 тахогенератор, имевший большую петлю гистерезиса, установлен к тому же непосредственно над кабелями, по которым протекает ток генератора. Магнитный поток, создаваемый током генератора, замыкался через остов тахогенератора. Как показали испытания, изменения тока генератора вызывали в выключенном из схемы тахогенераторе (при неизменном токе возбуждения его и числе оборотов) изменение напряжения приблизительно на 2 в, что почти равно отклонению напряжения вследствие статизма регулирования.

Опыты показали также значительное влияние температуры обмоток тяговых двигателей на настройку узла регулирования пускового тока.

Поэтому необходима дальнейшая работа по улучшению схемы автоматического регулирования, а также по улучшению характеристики возбuditеля с целью уменьшения отклонения характеристики генератора от кривой постоянной мощности при саморегулировании.

23. СХЕМА С УГОЛЬНЫМ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

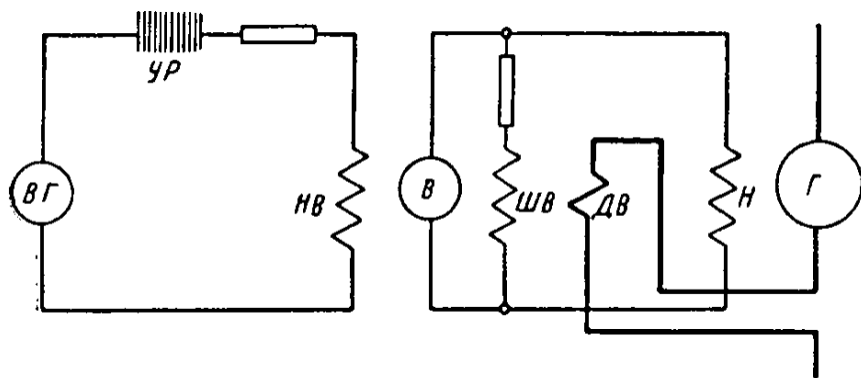
На фиг. 62 показана упрощенная схема устройства регулятора, применяемого фирмой Вестингауз (США) на поездных и мощных маневровых тепловозах (в частности на тепловозе Д^Б). На валике 2 центробежного регулятора 1, связанном с рейками топливных насосов, укреплен рычаг 3. При увеличении мощности генератора



Фиг. 62. Схема действия угольного гидравлического регулятора :

1 — регулятор дизеля; 2 — валик исполнительного органа; 3 — рычаг; 4 — стержень; 5 — золотник; 6 — управляющий клапан; 7 и 12 — пружины; 8 — вращающийся клапан; 9 — сервомотор; 10 — поршень; 11 — рычаг с роликом; УР — угольный реостат.

(при уменьшении свободной мощности дизеля) центробежный регулятор приходит в действие и валик 2 поворачивает рычаг 3 против часовой стрелки, увеличивая подачу топлива. Когда валик 2 достигает положения полной подачи топлива, стержень 4 соприкасается со стержнем золотника 5. При дальнейшем увеличении мощности генератора золотник 5 опускается, открывая доступ масла к вращающемуся клапану 8 и затем к сервомотору 9. Под давлением масла поршень 10 перемещается влево и, поворачивая рычаг 11,



Фиг. 63. Схема включения угольного реостата :

Г — генератор; Н — обмотка возбуждения Г; В — возбудитель; НВ, ШВ, ДВ — обмотки возбуждения В; ВГ — вспомогательный генератор; УР — угольный реостат.

Вследствие этого сопротивление столбика, являющегося угольным реостатом, увеличивается.

Угольный реостат УР включен (фиг. 63) в цепь обмотки НВ независимого возбуждения возбудителя. Следовательно, увеличение сопротивления УР приводит к снижению напряжения возбудителя и генератора и к уменьшению момента сопротивления генератора. Последнее вызывает увеличение угловой скорости дизель-генератора

и поворот рычага 3 по часовой стрелке. Золотник 5 перекрывает отверстие и останавливает поршень 10.

При уменьшении нагрузки генератора золотник 5, поднимаясь, соединяет маслопровод сервомотора со стоком. Под действием пружины 12 поршень сервомотора перемещается вправо, угольный столбик сжимается и возбуждение генератора увеличивается, пока вновь не наступит равновесие между моментами теплового двигателя и генератора. При малой нагрузке генератора золотник находится в крайнем верхнем положении, столбик — в максимально сжатом состоянии, и ток в независимой обмотке возбuditеля имеет максимальное значение. Регулятор теплового двигателя устанавливает подачу топлива в соответствии с мощностью генератора.

В регуляторе теплового двигателя предусмотрен упор для регулирующего органа, ограничивающий максимальную подачу топлива. Положение максимальной подачи соответствует положению рычага 3, при котором золотник 5 полностью открывает отверстие для входа масла в сервомотор. При установившемся положении золотник закрывает проходные отверстия, следовательно, регулятор генератора поддерживает подачу топлива, несколько меньшую, чем при положении упора.

Положение рычага 3 не зависит в установившемся режиме от положения поршня 10. Поэтому регулятор генератора является астатическим. Его нечувствительность определяется трением в золотнике и мертвым ходом последнего. Как известно, при астатических регуляторах нередко возникают колебания и для обеспечения устойчивой работы требуется введение обратных связей или уменьшение скорости исполнительного органа. В схеме фиг. 62 обратные связи отсутствуют. Для уменьшения скорости поршня 10 введен вращающийся клапан 8, который приводится от вала дизеля и пропускает масло лишь малыми порциями (когда отверстие в клапане соединяет маслопроводы). Нормальное время хода поршня 10 составляет приблизительно 10—20 сек. в сторону увеличения сопротивления и 60—80 сек. в сторону уменьшения сопротивления. Разница в скорости перемещения поршня сделана с целью более быстрого устранения перегрузки и является результатом того, что усилие, создаваемое давлением масла, больше усилия, передаваемого на поршень 10 от пружины 12.

По принципу действия регулятор генератора можно отнести к нелинейным системам релейного регулирования с импульсным звеном [12], [21].

Описанная схема является системой каскадного регулирования. При неполной нагрузке дизеля действует один регулятор дизеля. Неравномерность регулирования угловой скорости $\Delta\omega$, зависит от статизма и нечувствительности регулятора. В тепловозах, выполненных по данной схеме, применяется гидромеханический центробежный регулятор с гибкой обратной связью (изодромный), статизм которого равен нулю.

При полной нагрузке действуют оба регулятора. Неравномерность регулирования мощности дизеля Δ зависит при этом не только

от неравномерности регулятора дизеля Δ_d , но и от неравномерности регулятора генератора Δ_g .

Мощность теплового двигателя при предельных отклонениях равна

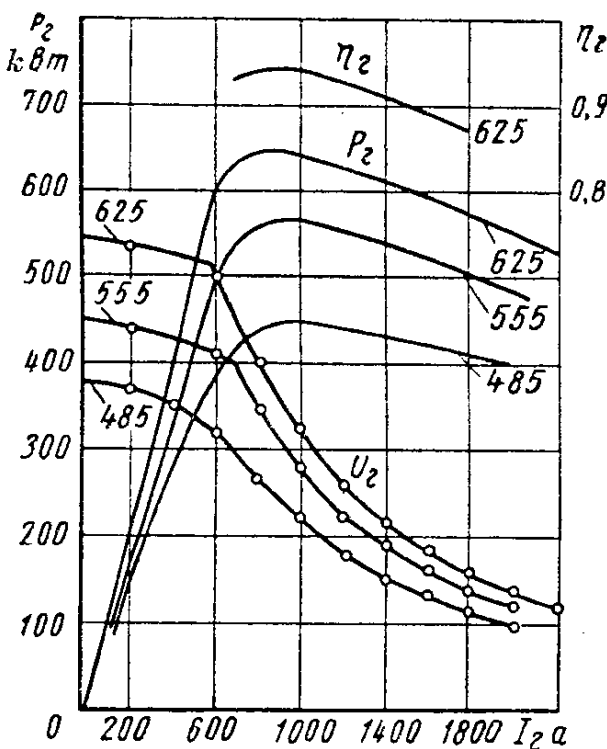
$$N_e (1 \pm \Delta) = \frac{M_d (1 \pm \Delta_g) n (1 \pm \Delta_d)}{716};$$

отсюда

$$\Delta = \Delta_g + \Delta_d + \Delta_g \Delta_d. \quad (39)$$

Пренебрегая последним членом, можно считать, что неравномерность регулирования всей системы каскадного регулирования равна сумме неравномерностей регуляторов дизеля и генератора. В данном случае регулятор генератора является астатическим и его неравномерность, как и регулятора дизеля, определяется нечувствительностью, зависящей от мертвого хода золотника и сил трения.

В схеме фиг. 63 используется возбуждатель с радиально-расщепленными полюсами, обеспечивающий характеристику генератора, близкую к гиперболе (фиг. 39); поэтому диапазон изменения возбуждения генератора за счет гидравлического регулятора относительно мал. На фиг. 64 приведены опытные характеристики генератора тепловоза ДБ при 625, 555 и 485 об/мин и работающем гидравлическом регуляторе. На фиг. 64 нанесена также кривая зависимости к. п. д. генератора от нагрузки при $n = 625$ об/мин. Кривая мощности P_g генератора почти точно следует за кривой к. п. д., что указывает на то, что мощность дизеля поддерживается практически постоянной. На фиг. 65 приведены кривые зависимости падения напряжения U_p в угольном реостате от нагрузки, записанные при снятии характеристик фиг. 64. Сопоставление этих кривых с кривой мощности $P_g = f(I_g)$ при замкнутом накоротко реостате УР (фиг. 39) показывает, что отклонение



Фиг. 64. Зависимость мощности P_g , напряжения U_g и к. п. д. η_g генератора тепловоза ДБ от тока I_g при включенном угольном регуляторе для различных чисел оборотов.

формы характеристики генератора вызывает соответствующие изменения падения напряжения в реостате.

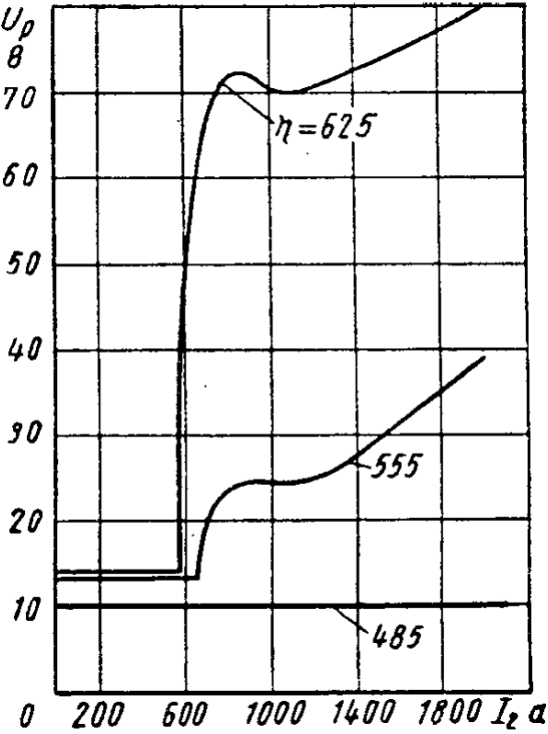
Регулятор генератора приходит в действие при полной подаче топлива независимо от угловой скорости. В некотором диапазоне угловых скоростей дизель работает по внешней характеристике, так как при пониженных оборотах регулятор генератора увеличивает возбуждение возбуждателя. Диапазон работы по внешней характеристике зависит от температуры обмоток возбуждения, свободной

мощности дизеля и т. д. В тепловозе Д^Б при холодных обмотках регулятор поддерживает постоянную подачу топлива при снижении контроллером управления угловой скорости до 450—500 об/мин, следовательно, схема пригодна для дизелей, допускающих работу по внешней характеристике в некотором диапазоне.

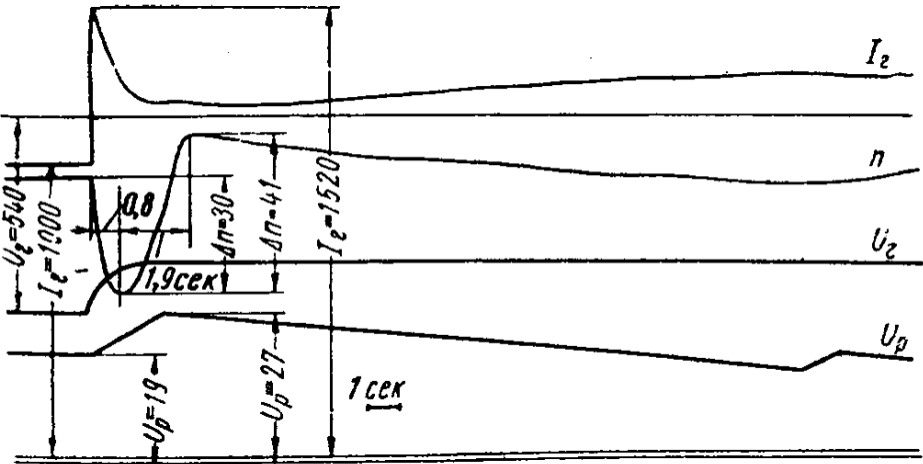
Рассматриваемая система регулирования дизель-генератора содержит много существенных нелинейностей: нелинейность характеристики и петля магнитного гистерезиса возбuditеля; наличие нечувствительности и импульсный характер действия золотника, который изменяет процесс регулирования практически скачкообразно; прерывистое действие вращающегося клапана. Процесс регулирования усложняется также различными действиями регуляторов дизеля и генератора. При уменьшении нагрузки оба регулятора действуют одновременно, но не синхронно, так как уравнения звеньев и постоянные времени их различны у обоих регуляторов. При увеличении нагрузки сначала действуют оба регулятора, затем исполнительный орган регулятора дизеля достигает положения упора и действует один регулятор генератора. Эти обстоятельства затрудняют математический анализ устойчивости и переходных процессов и, кроме того, снижают надежность их результатов

(в особенности если учесть, что данная система регулирования описывается системой из 10—12 дифференциальных уравнений).
Ниже приводятся некоторые результаты опытной проверки переходных процессов, полученных при реостатных и поездных испытаниях тепловоза Д^Б.

На фиг. 66 показана осциллограмма переходного процесса при скачкообразном изменении тока генератора, нагруженного реостатом.

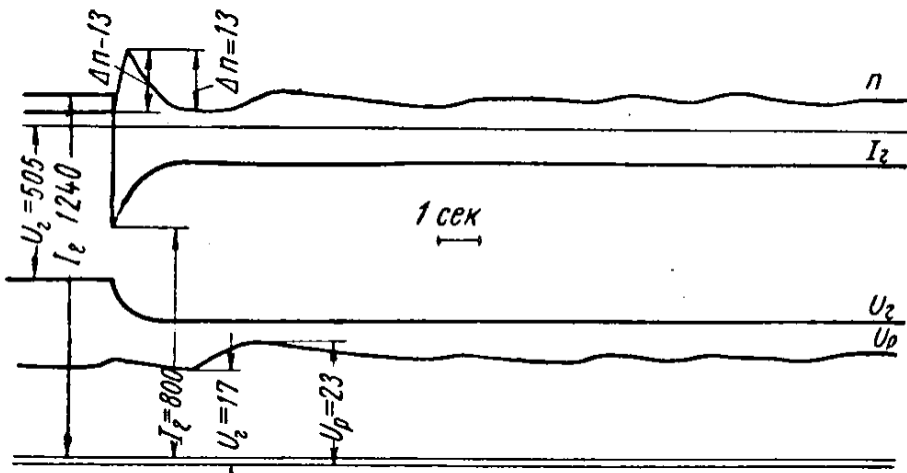


Фиг. 65. Зависимость напряжения на зажимах угольного реостата от тока генератора при различных числах оборотов.



Фиг. 66. Переходный процесс после увеличения тока генератора при реостатных испытаниях тепловоза Д^Б.

Поскольку уменьшение напряжения I_g генератора отстает во времени от увеличения тока I_g , дизель вначале перегружается, угловая скорость n падает, что приводит в действие регулятор генератора.



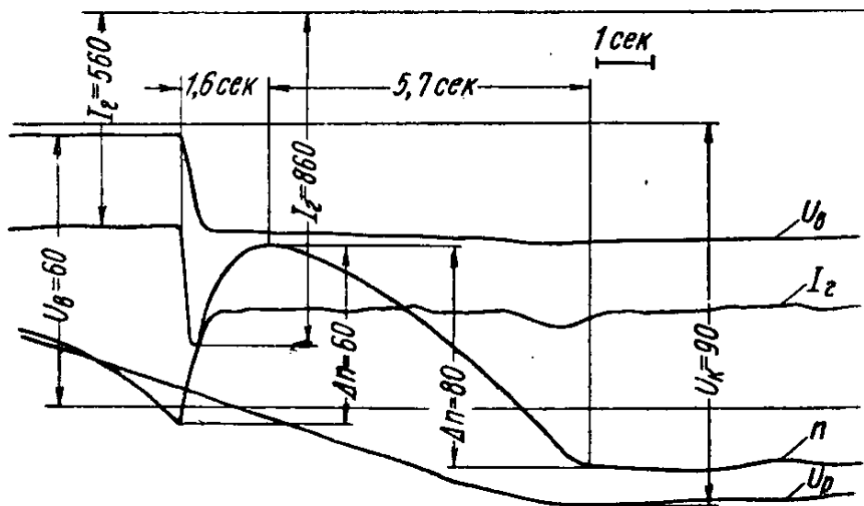
Фиг. 67. Переходный процесс после уменьшения тока генератора при реостатных испытаниях тепловоза ДБ.

Напряжение U_p на зажимах угольного реостата изменяется практически по прямой линии. Переходный процесс имеет колебательный характер. Колебания затухают через 8—10 циклов. Динамическая ошибка по угловой скорости достигает примерно 5%.

после уменьшения тока генератора, работающего на реостат. При таком же приблизительно скачке тока, как на фиг. 64, отклонение угловой скорости составило лишь около 2%, что объясняется одновременным действием обоих регуляторов. Переходный процесс также является колебательным, но с меньшей амплитудой и периодом.

На фиг. 68 изображен переходный процесс, записанный во время поездных испытаний при включении контакторов ослабления поля тяговых двигателей. Процесс близок по характеру к изображенному на фиг. 66, но падение угловой скорости достигает 10% и промежуток времени до устранения перегрузки занимает около 7 сек

Разница в переходных процессах обусловлена тем, что осциллограммы фиг. 66 и 67 снимались непосредственно после заливки гидропривода регулятора генератора свежим подогретым маслом, а осциллограмма фиг. 68 снималась при охлажденном гидроприводе. Как показали измерения, скорость перемещения поршня гидропривода в первом случае была в 3—4 раза больше, что и вызвало колебательный переходный процесс. В переходном процессе фиг. 68 колебания не наблюдались.

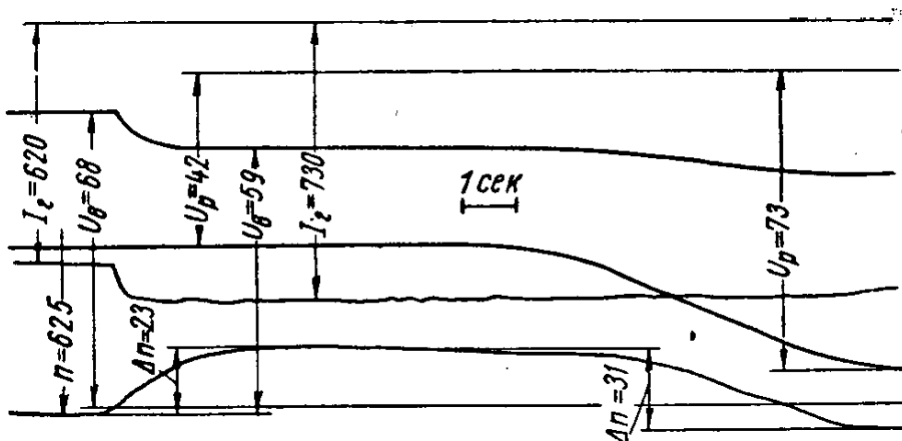


Фиг. 68. Переходный процесс после включения первой ступени ослабления поля тяговых электродвигателей при поездных испытаниях тепловоза ДБ.

Осциллограмма фиг. 69 снята при переходе с первой ступени ослабления поля тяговых двигателей на вторую. Процесс характерен значительной задержкой начала действия регулятора генератора, обусловленной образованием воздушной подушки в гидроприводе.

В результате этого пониженная угловая скорость удерживалась около 13 сек. Переходный процесс протекал без колебаний.

Медленность протекания процесса регулирования и, как следствие этого, значительные отклонения угловой скорости в переходном процессе, а также зависимость работы регулятора от вязкости рабочей жидкости и возможность образования воздушных подушек являются недостатками рассматриваемой системы.



Фиг. 69. Переходный процесс после включения второй ступени ослабления поля электродвигателей при поездных испытаниях тепловоза ДБ.

24. СХЕМА С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ОБЪЕДИНЕННЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

Схема, приведенная на фиг. 70 в упрощенном виде, применена фирмой ДЖ ИИ (США) на тепловозах мощностью 2000 л. с.; подобная же схема использована в первой партии газотурбовозов мощностью 4500 л. с. [31], [25]. Электрогидравлический регулятор состоит из регулятора скорости РС и ограничителя подачи топлива ОП, каждый из которых имеет золотник с электромагнитным приводом и гидравлический сервомотор.

Возбудителем В генератора является электромашинный усилитель, обмотка возбуждения НВ которого питается от потенциометра через контактный движок Д1. Поршень П1 сервомотора регулятора скорости связан механически с двумя исполнительными органами: с рейками топливных насосов дизеля (через коробку КП) и с движком Д1, управляющим возбуждением генератора.

Поршень П1 управляется золотником, на который действует снизу усилие пружины и сверху усилие электромагнита. При установившемся режиме работы двигатель-генератора отверстия золотника перекрыты. Ток катушки K_p равен

$$i_p = \frac{U_T}{R_3 + R_p} = \frac{a_T n}{R_3 + R_p} a, \quad (40)$$

где U_T — напряжение тахогенератора Т, приводимого от двигателя генератора, в в;

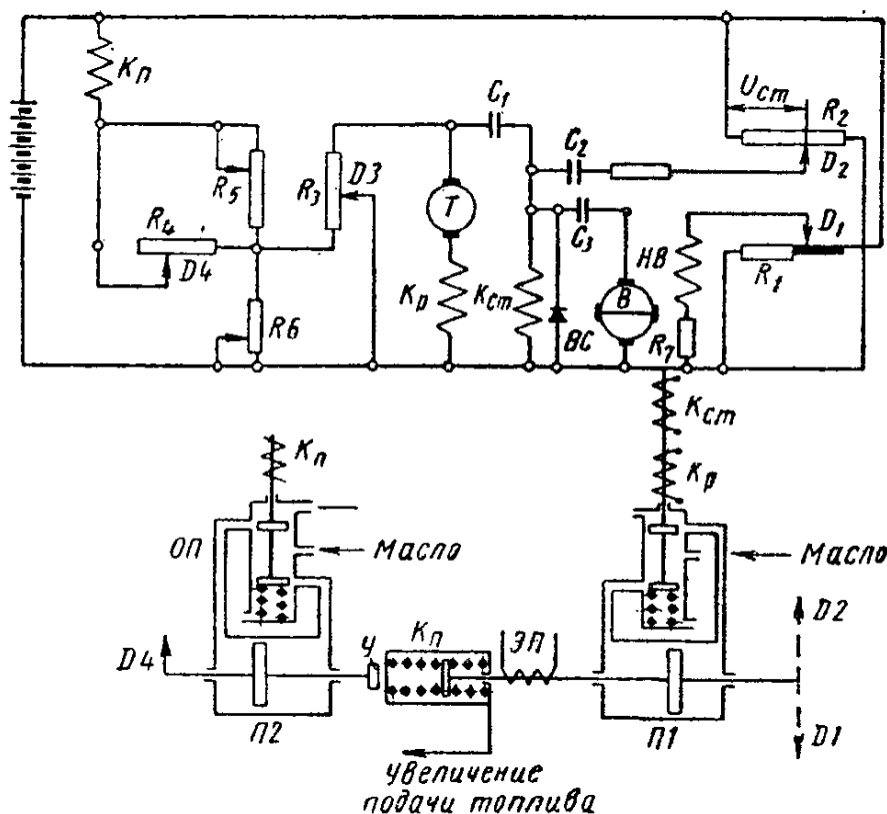
a_T — постоянный коэффициент;

R_3 — сопротивление включенной части реостата в ом;

R_p — сопротивление катушки K_p в ом.

Положению золотника, при котором отверстия золотника закрыты, соответствует определенное усилие пружины и уравновешивающее его усилие электромагнита и, следовательно, определенное значение тока катушки и установившейся угловой скорости.

При изменении нагрузки изменяется угловая скорость и ток катушки. Золотник перемещается вверх или вниз, в результате



Фиг. 70. Принципиальная схема объединенного электрогидравлического регулятора с ЭМУПП: В — возбудитель; НВ — обмотка возбуждения В; Д1—Д4 — контактные движки; ВС — селеновый вентиль; Кп — катушка ограничителя подачи; Кр — регулирующая катушка регулятора скорости; Кст — стабилизирующая катушка регулятора скорости; ОП — ограничитель подачи топлива; РС — регулятор угловой скорости; КП — коробка; П1, П2 — поршни; С1—С3 — конденсаторы; Т — тахогенератор; У — упор; ЭП — электромагнит выключения топлива; R_1 — R_7 — сопротивления.

чего уменьшается возбуждение возбудителя и генератора.

Процесс регулирования продолжается до тех пор, пока восстановится равновесие между двигателем и генератором и золотник перекроет оба отверстия. Последнее становится возможным, когда угловая скорость восстанавливает первоначальное значение. Следовательно, угловая скорость, поддерживаемая регулятором, не зависит от положения исполнительного органа, и регулятор является астатическим.

Настройка регулятора осуществляется движком Д3, при перемещении которого вверх уменьшается сопротивление R_3 , что вызывает уменьшение установившейся угловой скорости. Движок Д3 управляется рукояткой контроллера машиниста.

чего поршень П1 перемещается в таком направлении, чтобы восстановить равновесие между тепловым двигателем и генератором. Например, при увеличении нагрузки угловая скорость падает, золотник под действием пружины поднимается и поршень П1 движется налево, увеличивая подачу топлива. Движок Д1 при этом скользит по контактной пластине и ток в обмотке НВ сохраняет максимальное значение.

Когда коробка КП касается упора У, увеличение подачи топлива прекращается. Если перегрузка теплового двигателя при этом еще не устранена, поршень П1 и движок Д1 перемещаются дальше, вслед-

Для обеспечения устойчивой работы регулятора предусмотрена стабилизирующая катушка K_{cm} , присоединенная через конденсаторы C_1 , C_2 и C_3 к тахогенератору, движку D_2 и возбuditелю B . При установившемся режиме ток в катушке K_{cm} равен нулю.

При переходных процессах изменение угловой скорости, положения x поршня $П_1$ и напряжения U_e возбuditеля приводит к появлению тока в стабилизирующей катушке.

Чувствительным элементом регулятора является электромагнит с тахогенератором, пружиной и золотником. Его работа описывается следующими уравнениями.

Уравнение цепи катушки K_p , если пренебречь взаимоиндукцией между катушками K_p и K_{cm} , равно

$$a_T n = i_p (R_3 + R_p) + L_p \frac{di_p}{dt}, \quad (41)$$

где L_p — коэффициент самоиндукции катушки.

Уравнение сил, действующих на золотник:

$$F_p + F_{cm} - F_{np} - F_{mp} = m \frac{d^2 z}{dt^2}, \quad (42)$$

где $F_p = f(i_p, z)$ — усилие, создаваемое катушкой K_p ;
 $F_{cm} = f(i_{cm}, z)$ — усилие, создаваемое катушкой K_{cm} ;
 $F_{np} = F_{np0} + k_{np} z$ — усилие пружины (F_{np0} — усилие начальной затяжки);

$F_{mp} = D \frac{dz}{dt}$ — сила вязкого трения;

m — масса подвижных частей, связанных с золотником;

z — координата золотника.

Ток в цепи катушки K_{cm} зависит от изменения напряжения на обкладках конденсаторов C_1 , C_2 и C_3 . Напишем уравнения для цепи конденсаторов C_1 , C_2 и C_3 :

$$L_{cm} \frac{d^2 i_{cm}}{dt^2} + R_{cm} \frac{di_{cm}}{dt} + \frac{1}{C_1} i_{c1} = a_T \frac{dn}{dt};$$

$$L_{cm} \frac{d^2 i_{cm}}{dt^2} + R_{cm} \frac{di_{cm}}{dt} + \frac{1}{C_2} i_{c2} + R_8 \frac{di_{c2}}{dt} = \frac{dU_{cm}}{dt} = b \frac{dx}{dt};$$

$$L_{cm} \frac{d^2 i_{cm}}{dt^2} + R_{cm} \frac{di_{cm}}{dt} + \frac{1}{C_3} i_{c3} = \frac{dU_e}{dt};$$

$$i_{cm} = i_{c1} + i_{c2} - i_{c3},$$

где L_{cm} , R_{cm} — коэффициент самоиндукции и сопротивления катушки K_{cm} ;

C_1, C_2, C_3 — емкости конденсаторов;

x — координата поршня $П_1$;

b — коэффициент пропорциональности между напряжением U_{cm} , снимаемым с потенциометра R_2 , и координатой x .

Если пренебречь массой золотника и его трением, а также индуктивностью и сопротивлением стабилизирующей катушки, то уравнение чувствительного элемента в безразмерных отклонениях может быть приведено к виду

$$z = k_T n + T_1 p n - T_2 p x + T_3 p U_s \quad (43)$$

где

$$k_T = \frac{i_{pH} \frac{\partial F_p}{\partial i_p}}{k_{np} z_H}; \quad (44)$$

$$T_1 = \frac{C_1 a_T n_H \frac{\partial F_{cm}}{\partial i_{cm}}}{z_H k_{np}}; \quad (45)$$

$$T_2 = \frac{C_2 b x_H \frac{\partial F_{cm}}{\partial i_{cm}}}{k_{np} z_H}; \quad (46)$$

$$T_3 = \frac{C_3 U_{вн} \frac{\partial F_{cm}}{\partial i_{cm}}}{k_{np} z_H}. \quad (47)$$

Производные $\frac{\partial F_p}{\partial i_p}$ и $\frac{\partial F_{cm}}{\partial i_{cm}}$ определяются по статическим характеристикам $F_p = f(i_p)$ и $F_{cm} = f(i_{cm})$ для точки установившегося режима и $z = z_H$.

Первый член правой части равенства (43) является основным входным воздействием, пропорциональным отклонению угловой скорости. Второй член — воздействие, пропорциональное производной регулируемой величины. Последние два члена представляют гибкие обратные связи. Воздействие по производной ускоряет начало процесса регулирования. Обратная связь по перемещению исполнительного органа замедляет процесс регулирования вблизи нового положения. Обе эти связи повышают устойчивость системы регулирования. Обратная связь по напряжению возбудителя ускоряет уменьшение подачи топлива при выключении цепи возбуждения генератора и тем снижает нарастание угловой скорости дизель-генератора. Индуктивность и сопротивление стабилизирующей катушки ослабляет влияние гибких связей, уменьшая ток в катушке. Поэтому их следует выбирать возможно меньшими.

Механизм ограничения подачи топлива по конструкции аналогичен регулятору скорости, но имеет одну катушку K_n . Катушка K_n включена на зажимы аккумуляторной батареи последовательно с реостатами R_3 , R_4 , R_5 и R_6 .

При перемещении движка ДЗ вверх для снижения угловой скорости увеличивается часть реостата R_3 , введенная в цепь катушки K_n . Ток в катушке уменьшается, вследствие чего золотник поднимается под действием пружины и поршень П2 перемещается вправо, передвигая упор У и уменьшая предельную подачу топлива. Одно-

временно перемещается движок Д4, уменьшая сопротивление в цепи катушки K_n . Поршень П2 останавливается, когда восстанавливается первоначальное значение тока в катушке K_n и золотник закрывает отверстия. Таким образом, каждому положению движка Д3 соответствует определенное установившееся положение движка Д4 и упора У. Этим достигается изменение крутящего момента теплового двигателя в зависимости от изменения угловой скорости. Желательная зависимость $M_d = f(n)$ устанавливается настройкой сопротивлений R_5 и R_6 .

Селеновый клапан ВС включен в схему для получения различной скорости регулирования при нагрузке и разгрузке теплового двигателя. Якорь электромагнита ЭП механически соединен с рейками топливных насосов и прижат к коробке КП при включенной катушке. Выключение катушки ЭП приводит к быстрому выключению подачи топлива, что происходит при срабатывании реле давления масла и других защитных устройств. На фиг. 70 не показаны другие защитные и блокирующие устройства, предусмотренные в схеме.

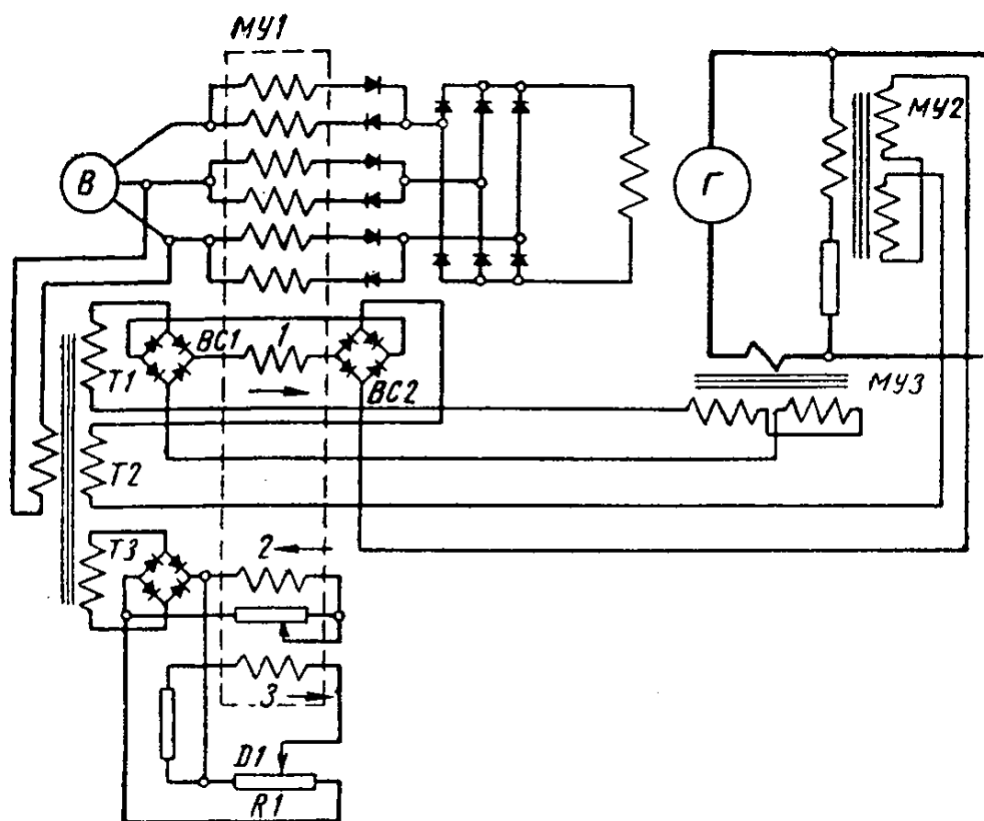
Неравномерность регулирования определяется нечувствительностью измерительного органа — тахогенератора, электромагнита и золотника. Как и в схеме фиг. 48, отклонения угловой скорости могут быть вызваны изменением магнитного потока тахогенератора и падения напряжения на щетках. Для снижения этих отклонений тахогенератор выполняется трехфазным с постоянными магнитами. Для питания катушки ток тахогенератора выпрямляется по мостовой схеме. Однако выпрямитель также может вносить некоторое отклонение тока вследствие изменения падения напряжения в нем по его вольтамперной характеристике (при изменении температуры и в результате старения). Изменение температуры катушки K_p , мертвый ход и трение золотника также увеличивают неравномерность регулирования. Однако все эти отклонения могут быть сделаны достаточно малыми.

Достоинствами системы регулирования являются объединение регуляторов теплового двигателя и генератора в единую конструкцию (что избавляет от взаимной подстройки их), а также возможность установить желательную зависимость $M_d = f(n)$. С другой стороны, схема сложна. В связи с необходимостью управления несколькими локомотивами по системе многих единиц, вместо движка Д3 применяется реле, переключающее ступени сопротивления R_3 .

В тепловозах для получения восьми рабочих положений использованы четыре реле, имеющие всего 14 контактов. Наладка схемы вследствие наличия трех дополнительных связей, действующих на одну стабилизирующую катушку, и большого числа реостатов, также представляет известную сложность.

Для регулирования пускового тока и ограничения возбуждения на тепловозах была применена схема с магнитными усилителями [32], в которой управляющая обмотка магнитного усилителя для регулирования пускового тока была включена параллельно обмотке

дополнительных полюсов генератора, а управляющая обмотка магнитного усилителя ограничения напряжения — параллельно якорю генератора. Выходное напряжение магнитных усилителей сравнивалось с падением напряжения в добавочном сопротивлении в цепи обмотки НВ и в случае превышения его уменьшало ток возбуждения возбудителя. Для питания обмоток магнитных усилителей предусмотрен генератор переменного тока с частотой 400 гц.



Фиг. 71. Принципиальная схема регулирования генератора с трехфазным возбудителем и магнитными усилителями:

В — возбудитель; Г — генератор; Д1 — диод; МУ1—МУ3 — магнитные усилители; Т1—Т3 — вторичные обмотки трансформатора; R_1 — сопротивление.

В последние годы фирма отказалась от применения электромагнитного усилителя поперечного поля и заменила его трехфазным возбудителем переменного тока (фиг. 71). В цепь фаз возбудителя включены последовательно шесть обмоток переменного тока магнитного усилителя МУ1, названного «амплистатом». В цепь каждой обмотки переменного тока включен выпрямитель. Обмотки переменного тока и выпрямители включены так, что помимо переменного магнитного потока в сердечниках усилителя имеется постоянный по направлению магнитный поток, создаваемый суммой намагничивающих сил обмоток переменного тока и обмотки управления 2, т. е. магнитный усилитель выполнен с внутренней положительной обратной связью. Вследствие этого усилитель обладает большим коэффициентом усиления. Зависимость выпрямленного тока на выходе усилителя (тока возбуждения генератора) от тока в обмотке управления 2 представлена на фиг. 72. После магнитного усилителя выпрямленный ток поступает в обмотку возбуждения генератора.

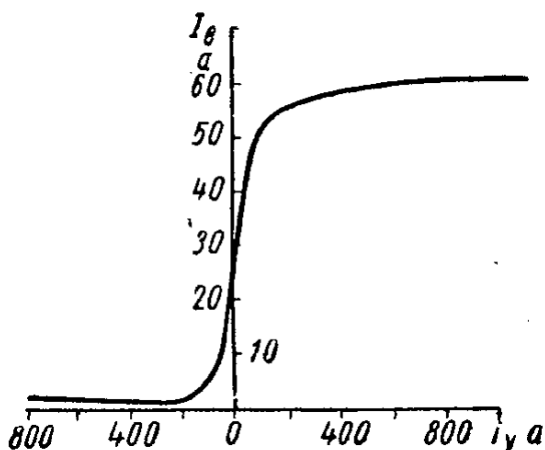
Описанная выше схема регулирования мощности (фиг. 70) воздействует на движок Д1 потенциометра R_1 , включенного на выпрямленное напряжение вторичной обмотки трансформатора, первичная обмотка которого питается от трехфазного возбудителя. Катушка K_p регулятора скорости (фиг. 70) в новой схеме также питается от трехфазного возбудителя, который используется как датчик для измерения угловой скорости. При изменении нагрузки регулятор скорости изменяет положение движка Д1, вследствие чего изменяется ток в катушке управления 3 магнитного усилителя МУ1. Обмотка управления 2 используется как задающая обмотка и также питается выпрямленным напряжением, пропорциональным напряжению трехфазного возбудителя.

Обмотка 2 дает положительный сигнал, под действием которого сердечник магнитного усилителя насыщается (при отсутствии тока в других обмотках), реактивное сопротивление обмоток переменного тока уменьшается до минимального значения и, следовательно, ток возбуждения генератора при номинальной угловой скорости достигает максимального значения.

Обмотка 3 действует навстречу обмотке 2 (стрелками на фиг. 71 условно показаны направления н. с. обмоток). Когда ток нагрузки генератора достигает значения, при котором мощность генератора становится больше свободной мощности теплового двигателя, движок Д1 перемещается так, что ток в обмотке 3 увеличивается, насыщение сердечника магнитного усилителя уменьшается и ток возбуждения генератора понижается до величины, при которой момент генератора уравнивает момент теплового двигателя.

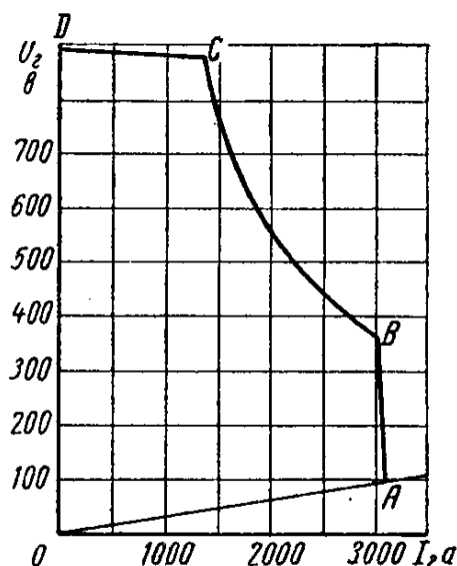
Обмотка управления 1 магнитного усилителя МУ1 через выпрямители ВС1 и ВС2 включена последовательно с обмотками переменного тока магнитных усилителей МУ2 и МУ3 и действует навстречу обмотке 2. С ее помощью осуществляется отсечка по максимальному току и по максимальному напряжению генератора. Обмотка управления магнитного усилителя МУ2 включена последовательно с добавочным сопротивлением на напряжение генератора Г. Обмоткой управления магнитного усилителя МУ3, представляющего собой трансформатор постоянного тока, является кабель, соединяющий генератор с тяговыми двигателями.

При пуске поезда, когда напряжение генератора мало, индуктивное сопротивление обмоток переменного тока МУ2 велико и ток обмотки 1 определяется практически режимом МУ3. При увеличении тока генератора индуктивное сопротивление обмоток переменного тока МУ3 уменьшается и ток обмотки 1 возрастает. При токе гене-



Фиг. 72. Зависимость тока возбуждения генератора от тока управления МУ1 для схемы фиг. 71.

ратора больше допустимого намагничивающая сила обмотки 1 больше намагничивающей силы обмотки 2. При этом результирующая н. с. управления является отрицательной и ток возбуждения генератора, как видно из фиг. 72, близок к нулю. Усилители МУЗ и МУ1 настраиваются так, что после включения силовой цепи при остановленном поезде устанавливается максимальный пусковой ток (фиг. 73, точка А). Уменьшение тока генератора при разгоне поезда вызывает уменьшение н. с. обмотки 1 и резкое увеличение тока возбуждения генератора. Напряжение генератора при пуске поезда увеличивается по линии АВ (фиг. 73).



Фиг. 73. Внешняя характеристика генератора при схеме фиг. 71.

Так как по принципу действия схемы ток генератора должен изменяться для того, чтобы изменялось его напряжение, регулирование тока является статическим. Статизм регулирования зависит от крутизны характеристик МУ1 и МУЗ и от изменения режима усилителя МУ2 при изменении тока обмотки 1 усилителя МУ1 (на что влияет также изменение температуры обмотки 1).

При изменении угловой скорости теплового двигателя изменяется н. с. задающей обмотки 2 усилителя МУ1. Так как при регулировании пускового тока н. с. обмотки 1 близка по величине к н. с. обмотки 2, величина пускового тока приблизительно пропорциональна угловой скорости.

Таким образом, в новой схеме регулирования пускового тока фирмы ДЖИИ применено, как и в схемах фиг. 48, сравнение сигнала, пропорционального току генератора, с сигналом, пропорциональным угловой скорости двигатель-генератора.

В процессе пуска мощность генератора меньше свободной мощности теплового двигателя и шток РС регулирует подачу топлива; при этом ток в обмотке 3 усилителя МУ1 равен нулю, так как движок Д1 находится в крайнем левом положении (фиг. 71).

При увеличении напряжения генератора подача топлива достигает предельного значения, определяемого положением упора (фиг. 70), и дальнейшее увеличение напряжения по линии АВ прекращается, так как перегрузка теплового двигателя вызывает увеличение тока в обмотке 3, что в известной мере компенсирует уменьшение тока в обмотке 1. Напряжение изменяется по кривой ВС постоянной мощности теплового двигателя. С увеличением напряжения увеличивается ток в цепи усилителя МУ2 и уменьшается ток усилителя МУЗ, а движок Д1 перемещается так, чтобы результирующая н. с. управления обмоток 1, 2, и 3 обеспечивала требуемый по нагрузке теплового двигателя ток возбуждения генератора. Усилитель МУ2 настроен так, что при отсутствии тока в обмотке 3 напряжение генератора ограничивается линией CD.

Вследствие уменьшения тока в задающей обмотке 2 при снижении угловой скорости, предельное напряжение генератора приблизительно пропорционально угловой скорости двигатель-генератора.

Новая схема (фиг. 71) значительно лучше, чем схема фиг. 70. Замена электромашинного усилителя с поперечным полем, тахогенератора и генератора переменного тока для питания магнитных усилителей одним трехфазным возбудителем и магнитным усилителем упрощает обслуживание и повышает надежность работы. Использование трансформатора тока для получения сигнала в системе регулирования пускового тока вместо падения напряжения в силовых обмотках генератора двигателя в схеме ДЖИИ и в схеме (фиг. 48) повышает точность регулирования пускового тока и практически исключает влияние температуры обмоток на величину пускового тока.

Вместе с тем магнитный усилитель МУ1, включенный в цепь возбуждения генератора, должен быть рассчитан на относительно большую мощность, так же как и выпрямители в его цепи. Вследствие падения напряжения в усилителе МУ1 и выпрямителях мощность возбудителя и потери мощности на возбуждение увеличиваются.

Точность регулирования угловой скорости и мощности зависит от точности измерения угловой скорости возбудителем, который является в данной схеме датчиком для электрогидравлического регулятора. Так как нагрузка возбудителя изменяется в широких пределах, его напряжение при заданной угловой скорости изменяется из-за внутреннего падения напряжения и размагничивающего влияния реакции якоря. Для уменьшения этих отклонений в цепь питания задающей обмотки и катушки регулятора включен насыщенный дроссель (не показанный в схеме), однако это не может полностью исключить все отклонения.

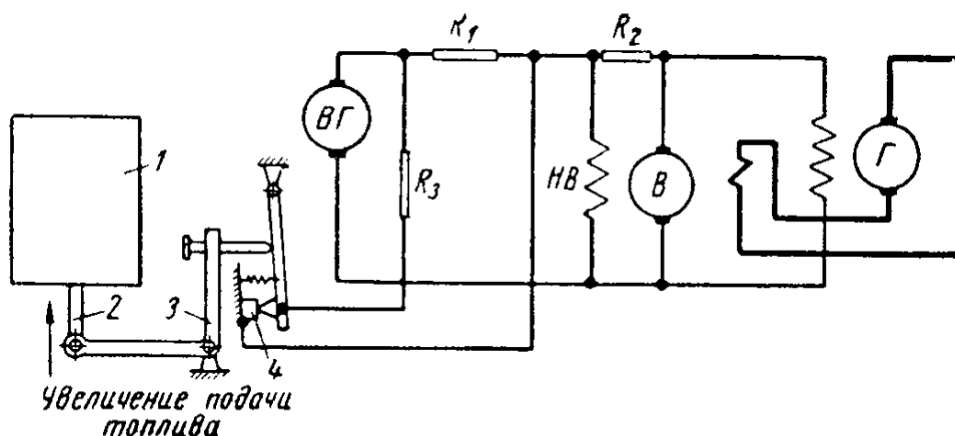
В схемах фиг. 70 и 71 отсутствует саморегулирование, поэтому неисправности в системе регулирования исключают возможность работы схемы в целом.

25. ВИБРАЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР ЦНИИ

На фиг. 74 приведена принципиальная схема вибрационного регулятора, разработанная сотрудниками Тепловозного отделения ЦНИИ МПС Т. Н. Хохловым, Е. В. Платоновым и В. Л. Равичем. Контакты 4 замкнуты, пока подача топлива меньше величины, установленной для дизеля, и размыкаются, когда шток 2 регулятора дизеля достигает положения, соответствующего этой подаче топлива.

При недогрузке дизеля контакты 4 замкнуты и ток в обмотке НВ возбудителя В имеет максимальное значение, так как параллельно сопротивлению R_1 подключено R_3 . При перегрузке контакты размыкаются и отключают сопротивление R_3 , уменьшая мощность генератора. При нормальном режиме работы на полной мощности рычаг 3 давит на подвижной контакт регулятора; вследствие механической вибрации корпуса дизеля контакты 4 вибрируют с большой

частотой, поддерживая некоторое среднее значение тока в обмотке НВ, требуемое для полной нагрузки теплового двигателя. При изменении свободной мощности двигателя или мощности, потребляемой генератором, начинает менять свое положение шток регулятора дизеля. При этом относительная продолжительность замкнутого состояния контактов меняется, вследствие чего изменяется средний ток обмотки НВ. Среднее положение рейки топливного насоса, а следовательно, и крутящий момент дизеля при этом также несколько



Фиг. 74. Принципиальная схема вибрационного регулятора мощности ЦНИИ :

1 — регулятор дизеля; 2 — шток регулятора дизеля; 3 — рычаг; 4 — контакты; В — возбуждатель; Г — генератор; ВГ — вспомогательный генератор.

изменяются. Таким образом, регулятор обладает некоторым статизмом, т. е. мощность не остается строго постоянной, а меняется с изменением режима работы. Величина статизма зависит от диапазона регулирования, затяжки пружины контактов и от передаточного отношения между перемещением реек топливных насосов и подвижного контакта (т. е. от длин рычагов, связывающих их). Опыты показали, что при уменьшении статизма увеличивается амплитуда автоколебаний.

Испытания регулятора на тепловозах ТЭ2 показали устойчивую работу регулятора при достаточной точности регулирования. Значительное количество тепловозов ТЭ2 оборудовано такими регуляторами, и эксплуатация показывает их удовлетворительную работу.

Первая попытка применения регулятора на тепловозе ТЭ3 не привела к успешным результатам. В опытах ЦНИИ 1956 г. не удалось получить устойчивой работы при удовлетворительной точности регулирования. Ведется дальнейшая работа в этом направлении.

Описанная система относится к каскадным системам регулирования. Регулятор по принципу действия является импульсным с принудительным размыканием. Основные преимущества такого регулятора: простота конструкции и возможность установки его на готовом тепловозе. К недостаткам относится наличие вибрирующих контактов и зависимость его работы от характера механической вибрации деталей дизеля. Регулирование пускового тока система не обеспечивает.

26. СООБРАЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Кроме рассмотренных выше систем, за границей применяются многие другие. Некоторые новые схемы разработаны в Советском Союзе и находятся в стадии исследований. Отсутствие данных эксплуатации систем, применяемых за рубежом, и отсутствие достаточного опыта работы отечественных схем не позволяет сделать конкретных выводов и рекомендаций. Поэтому ниже приводятся лишь общие соображения.

Системы саморегулирования с выпуклыми характеристиками наиболее просты и надежны в работе. Они обеспечивают благоприятные пусковые характеристики и удовлетворительное использование мощности дизеля, но лишь при небольшом диапазоне изменения тока генератора, а также при слабом насыщении его магнитной цепи (что ведет к увеличению его размеров) и при резко падающей характеристике $M_g = f(n)$, что свойственно лишь дизелям небольшой мощности и двухвальным газотурбинным установкам.

Применение возбuditелей с расщепленными полюсами обеспечивает более высокое использование мощности теплового двигателя при любых характеристиках последнего и при нормальном насыщении магнитной цепи генератора. Однако сильное насыщение магнитной цепи генератора, наличие в нем компенсационной обмотки или широкий диапазон изменения его напряжения ухудшают характеристики генератора.

Путем подбора схемы включения обмоток возбуждения генератора и его возбuditеля и степени насыщения их магнитных цепей возможно получить самые разнообразные зависимости $M_g = f(n)$ и тем самым обеспечить возможность работы любого теплового двигателя в режимах, близких к режимам наибольшей экономичности при пониженных угловых скоростях.

Устойчивость работы и характер переходных процессов в силовой установке также зависят от характеристик теплового двигателя, генератора и электродвигателей и от степени насыщения магнитной цепи электрических машин.

Анализ опытных характеристик показывает, что изменение условий работы теплового двигателя, мощности вспомогательных устройств и характеристик генератора в связи с гистерезисом магнитной цепи и изменением температуры обмоток приводит к рассогласованию характеристик теплового двигателя и генератора и ухудшает использование мощности. Влияние этих факторов может быть устранено применением замкнутых систем автоматического регулирования генератора.

В системах автоматического регулирования современных тепловозов и турбовозов используются три основных вида связи между регуляторами теплового двигателя и генератора: регулирование раздельное, каскадное и объединенное. Преимущество раздельного регулирования заключается в том, что регуляторы теплового двига-

теля и генератора конструктивно не связаны между собой и каждый из них вступает в действие, когда второй прекращает работу, достигая положения упора. Это дает возможность выбрать оптимальную систему регулирования для каждого из них, в частности применить для генератора более надежное электромашинное регулирование. Каждый регулятор может быть спроектирован, изготовлен и испытан со своим объектом и налажен независимо от другого, и на готовом локомотиве требуется лишь согласование их настройки. Необходимость точной взаимной настройки и возможность рассогласования регуляторов является недостатком этих систем.

В системах каскадного регулирования регулятор теплового двигателя также может выбираться, проектироваться и испытываться самостоятельно, но регулятор генератора не является самостоятельной конструкцией, а представляет собой узел, дополнительно пристраиваемый к регулятору теплового двигателя. Это ограничивает возможность выбора системы регулирования генератора и, в частности, исключает возможность электромашинного регулирования. Преимуществом систем такого вида является наличие одного датчика угловой скорости, что уменьшает опасность рассогласования регуляторов. С другой стороны, требуется точная настройка датчика регулятора генератора (золотника, контактов) по отношению к исполнительному органу регулятора теплового двигателя. При регулировании мощности одновременно изменяется магнитный поток генератора и подача топлива, что приводит к возможности некоторой перегрузки или недоиспользованию теплового двигателя по подаче топлива.

В системах отдельного и каскадного регулирования общая неравномерность регулирования мощности равна сумме неравномерностей обоих регуляторов. В системах объединенного регулирования имеется один регулятор для теплового двигателя, поэтому точность регулирования при прочих равных условиях несколько выше и отпадает необходимость взаимного согласования регуляторов (как это имеет место в других системах). При объединенном регулировании не могут быть использованы готовые конструкции регуляторов, разработанные для промышленных или других установок, и должны быть созданы регуляторы, предназначенные специально для локомотивов с электрической передачей.

Следует отметить, что при регулировании мощности двигатель-генератора нет необходимости добиваться очень высокой точности, так как регулирование здесь имеет целью не создание определенного режима потребителя, как это требуется, например, при регулировании напряжения или частоты источников питания, а лишь улучшает использование мощности. Поэтому не имеет смысла стремиться к неравномерности менее $\pm 1-1,5\%$, если это ведет к усложнению системы регулирования или понижению надежности ее работы.

Приведенные выше различия между группами систем не имеют решающего значения при выборе системы; в первую очередь следует руководствоваться степенью надежности работы, простотой настрой-

ки и обслуживания и тем, какие характеристики двигатель-генератора при работе на пониженной мощности и при пуске поезда может обеспечить система регулирования.

Система автоматического регулирования двигатель-генератора нередко комбинируется с системами саморегулирования. При таком сочетании изменение магнитного потока генератора в зависимости от тока нагрузки осуществляется в основном за счет саморегулирования, а автоматическое регулирование повышает использование мощности, компенсируя изменение температуры, вспомогательной нагрузки и т. д. Использование саморегулирования в сочетании с автоматическим регулированием полезно потому, что облегчает работу системы автоматического регулирования и ее осуществление и повышает надежность работы всей установки, так как в случае неисправности элементов регулирующего устройства двигатель-генератор может работать при саморегулировании. Поскольку высокое использование мощности требуется только при работе теплового двигателя с номинальной угловой скоростью, можно ограничить работу системы автоматического регулирования только одним этим режимом работы. Использование саморегулирования совместно со статическим автоматическим регулированием позволяет уменьшить общий статизм системы. При пониженных угловых скоростях характеристики двигатель-генератора обеспечиваются за счет саморегулирования. Это особенно важно для систем раздельного и каскадного регулирования, в которых при отсутствии саморегулирования необходимо при снижении угловой скорости одновременно изменять настройку обоих регуляторов. Для того чтобы при отсутствии саморегулирования обеспечить работу двигателя по характеристике $M_d = f(n)$ наибольшей экономичности, во всех системах автоматического регулирования должна быть предусмотрена возможность изменения положения упора для исполнительного органа подачи топлива при заданной шкале угловых скоростей. Это усложняет устройство регулятора и его настройку. Поэтому в большинстве современных тепловозов и турбовозов применяется сочетание автоматического регулирования с саморегулированием.

На советских тепловозах пока применены две системы автоматического регулирования: вибрационный регулятор ЦНИИ на некоторых тепловозах ТЭ1 и ТЭ2 и тахометрическая схема (фиг. 48, г) на тепловозах ТЭ3. Опыт эксплуатации, пока еще небольшой, показал их работоспособность и возможность существенного повышения использования мощности дизеля при их применении. В то же время выявилась необходимость дальнейшего улучшения их работы и устранения недостатков.

Одновременно ведется также разработка и исследование новых схем. ХЭТЗ совместно с МЭИ работает над схемой с магнитными усилителями и трансформаторами постоянного тока а также совместно с ЛИИЖТ работает над применением в тепловозах двухкаскадного электромашинного регулятора. Схема объединенного гидродинамического регулирования газотурбинной установки раз-

рабатывается Коломенским тепловозостроительным заводом имени В. В. Куйбышева совместно с Московским высшим техническим училищем имени Баумана.

Для того чтобы добиться наиболее высоких технико-экономических показателей тепловозов и газотурбовозов, необходимо еще шире развивать проектные и исследовательские работы по улучшению электрической передачи, с обязательной последующей проверкой их в опытных локомотивах и в эксплуатации.

ПЕРЕЧЕНЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзерман М. А., Теория автоматического регулирования двигателей. ГИТТЛ, 1952.
2. Близнянский А. С., Локомотивостроение за рубежом, «Вестник машиностроения» № 9, 1955.
3. Гаккель Е. Я., Новая схема саморегулирования отечественных тепловозов, Сборник трудов ЛИИЖТ, № 147, 1954.
4. Горохов Н. В., Доманицкий С. М., Рудая К. И., Исследование схемы с магнитным усилителем, Труды ВНИИЖТ, вып. 87, 1954.
5. Дизельная тяга на рельсовом транспорте, ГТЖИ, 1956.
6. Димитрадзе А. С., Основы общей теории работы электрической передачи постоянной мощности, Машгиз, 1957.
7. Дмитриев В., Важные вопросы дальнейшего развития тепловозной тяги на дорогах СССР, «Железнодорожный транспорт» № 9, 1955.
8. Институт комплексных транспортных проблем АН СССР, Научная технико-экономическая информация по зарубежному транспорту, № 1, 1955.
9. Максимович Б. М., Фельдман Э. Д., Эффективное использование средств увеличения пропускной способности, «Железнодорожный транспорт» № 1, 1956.
10. Платонов Е. В., Степанов А. Д., Доманицкий С. М., Попов С. Д., Результаты сравнительных испытаний схем автоматического управления тепловозов, ГТЖИ, 1955.
11. Пойдо А. А., Рудая К. И., Тепловозы, ГТЖИ, 1949.
12. Попов Е. П., Динамика систем автоматического регулирования, ГИТТЛ, 1945.
13. Розенблат М. А., Магнитные усилители, Издательство «Советское радио», 1956.
14. Семичастнов И. Ф., Турбопередачи тепловозов, Машгиз, 1948.
15. Солодовников В. В. (ред.), Основы автоматического регулирования, Машгиз, 1954.
16. Степанов А. Д., Тепловозы и автомотриссы с электрической передачей, ГЭИ, 1948.
17. Степанов А. Д., Теплоэлектрический привод транспортных машин, Машгиз, 1953.
18. Степанов А. Д., Основные уравнения динамики тепловозов, Труды МЭИ имени Молотова, вып. 22, ГЭИ, 1956.
19. Хохлов Т. Н., Платонов Е. В., Тепловоз серии ТЭ2, результаты тягово-теплотехнических испытаний, ГТЖИ, 1952.
20. Центральное Статистическое Управление при Совете Министров СССР, Народное хозяйство СССР, Гос. стат. издательство, 1956.
21. Цыпкин Я. З., Теория релейных систем автоматического регулирования, ГИТТЛ, 1955.

22. Шишкин К. А., Гуревич А. Н., Степанов А. Д., Платонов Е. В., Советские тепловозы, Машгиз, 1956.
 23. Bulletin de l'association Internationale du Congres des Chemins de fer, 1956, N 1.
 24. Candee A. H., The renaissance of Electric Motive Power. „Electrical Engineering”, 1949, N 7, p. 597.
 25. Diesel Electrics... how to keep'em Rolling. New-York, 1954.
 26. Harres H., Kraftübertragung vom Dieselmotor auf die Achse bei Schienetriebfahrzeugen. „Maschinenbau und Wärmewirtschaft”, 1955, N 10.
 27. Howard A., Buckland B. O., Tests of a 4800-HP Locomotive Gas Turbine. “Railway Age”, 1949, Vol. 126, N 3.
 28. Knobloch H., Betrachtungen über die elektrische und hydraulische Leistungübertragung bei Dieselfahrzeugen. „Technische Rundschau”, 1955, N 2.
 29. Koffman Y. L., Railcar Performance Data. “Diesel Railway Traction”. 1956, N 2.
 30. Kugel F., Betrachtungen über die elektrische und hydraulische Leistungübertragung bei Dieselfahrzeugen. „Technische Rundschau”, 1955, N 51.
 31. Lewis C. B., A Power Plant Regulating System for Diesel-Electric Locomotives. “Transactions of AIEE”, 1947, vol. 66.
 32. Mc Elhenny S. W., Smith R. M., Static Excitation Control for D.-E. Locomotives. “Transactions of AIEE”, 1954, pt II.
 33. Packing More Punch into Diesel-Electric Locomotives, „Railway Transport”, 1956, N 4.
 34. Vignoles P., La Traction Diesel dans les Chemins de Fer. “Technique et applications du petrol”, 1955, dec.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Современное состояние тепловозной тяги	
1. Распространение тепловозной тяги в СССР и за рубежом	5
2. Параметры современных тепловозов и газотурбовозов	8
Глава II. Характеристики тепловых двигателей	
3. Характеристики транспортных дизелей	14
4. Характеристики газотурбинных установок	20
5. Условия работы двигателя при постоянной передаче ...	25
Глава III. Характеристики переменных передач	
6. Значение переменной передачи	29
7. Механическая передача	33
8. Гидравлическая передача	35
9. Гидромеханическая передача	37
10. Электрическая передача	39
11. Сравнение и области применения различных передач ...	45
12. Пути усовершенствования электрической передачи	51
Глава IV. Характеристики двигатель-генератора при саморегулировании	
13. Предельная характеристика генератора	53
14. Особенности систем автоматического регулирования двигатель-генератора	56
15. Основные принципы саморегулирования двигатель-гене- ратора	58
16. Саморегулирование при выпуклых характеристиках генератора	60
17. Саморегулирование при гиперболических характери- стиках генератора	64
18. Зависимость мощности двигатель-генератора от темпера- туры обмоток машин	71
19. Динамика силовой установки при саморегулировании двигатель-генератора	75
Глава V. Автоматическое регулирование двигатель-генератора	
20. Особенности систем автоматического регулирования двигатель-генератора	86
21. Классификация систем автоматического регулирования мощности (АРМ)	87
22. Схема электромашинного регулирования с тахогенера- тором	89
23. Схема с угольным гидравлическим регулятором	106
24. Схема с электрогидравлическим объединенным регулято- ром	111
25. Вибрационный регулятор ЦНИИ	119
26. Соображения по выбору систем регулирования двигатель- генератора	121
Перечень литературы	125

Александр Дмитриевич Степанов
ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОВОЗОВ И ГАЗОТУРБОВОЗОВ

Технический редактор *В. Д. Элькин*

Корректор *Р. Г. Случевская*

Обложка художника

Сдано в производство 14/VI 1957 г.

Подписано к печати 13/XI 1957 г. Т-10620

Тираж 2200 экз. Печ. л. 8

Уч. изд. л. 8,6 Бум. л. 4 Формат 60×92/16

Зак. 219

4205. — Университетская типография, Будапешт,
улица Дохань № 12.
Ответственный Дьюла Янка

4 р. 30 к.

Д1
16478

ОНЗ, ЧИТ./зала
НЕ ВЫДАЕТСЯ



Москва, Третьяковский проезд, 1