

В последнее время большое внимание уделяется повышению эффективности эксплуатируемого на российских железных дорогах подвижного состава, созданию тяговой техники нового поколения.

В публикуемой статье рассматривается один из путей совершенствования тягового привода для электроподвижного состава.

ФОРСАЖНЫЙ ТЯГОВЫЙ ПРИВОД

В.А. МНАЦКАНОВ, кандидат технических наук

В 1960-е годы на отечественном электроподвижном составе (трамвайные вагоны, вагоны метро, электропоезда и электровозы) началось внедрение тиристорно-импульсных систем управления (ТИСУ) тяговым электроприводом. К разработкам подключились крупнейшие научные организации и ведущие транспортные предприятия, были подготовлены сотни научных статей, диссертаций, проведены десятки научных конференций. Казалось, что ценой огромных усилий большого числа научных и инженерных работников электрическая тяга постоянного тока наконец-то нашла продуктивную концепцию для своего дальнейшего развития. Еще один шаг и можно будет начать выпуск электроподвижного состава с высоконадежными бесконтактными системами управления тяговыми двигателями. При этом предполагалось, что использование тиристорно-импульсных систем приведет к снижению расхода электроэнергии на тягу на 20-30% за счет исключения ее потерь в пусковых реостатах и применения рекуперативного торможения, а затраты на ремонт и техническое обслуживание электрооборудования сократятся в 2-3 раза за счет замены ненадежно работающей контактной аппаратуры более надежной бесконтактной.

Была еще одна немаловажная причина, почему отечественные ученые и инженеры выбрали для электроподвижного состава имен-

но такую систему управления коллекторными двигателями, а не инверторные системы управления (ИНСУ) асинхронными двигателями. Дело в том, что в стране к тому времени началось массовое производство силовых тиристорных и диодов, из которых не сложно было делать бесконтактные тиристорно-импульсные регуляторы. Они казались более простыми и доступными для широкого внедрения на всех видах подвижного состава постоянного тока.

Впервые систему ТИСУ опробовали в 1965-1970 гг. на электропоездах постоянного тока типа С³р-А6М, ЭР2 и ЭР22, которые были модернизированы специалистами Рижского филиала ВНИИвагоностроения. Переоборудованные электропоезда довольно длительное время эксплуатировались на Прибалтийской железной дороге. Примерно в то же время начались разработки ТИСУ для вагонов метрополитена. Они выполнялись двумя научными группами специалистов МИИТа под руководством профессора В.С. Хвостова и доцента А.И. Хоменко. В 1966 г. на Тбилиском электровозостроительном заводе при участии научной группы МЭИ под руководством профессора В.Е. Розенфельда был построен опытный электровоз постоянного тока с частотно-импульсными преобразователями.

Полномасштабное внедрение тиристорно-импульсных систем управления на новом подвижном

составе началось в 1998 г., когда в соответствии с профинансированной государством программой работ на ЗАО «Метровагонмаш» начался выпуск партии вагонов метрополитена новой конструкции модели 81-720/721 (вагоны типа «Яуза»). Разработчиком и поставщиком ТИСУ для них стал завод «Динамо», бывший в ту пору монопольным производителем тягового электрооборудования для вагонов метрополитена. Всего к 2000 г. «Метровагонмаш» изготовил 56 вагонов метро (8 семивагонных составов) типа «Яуза». Это был заключительный аккорд научно-технического эксперимента, растянувшегося на десятилетия.

Еще в 1997 г. были проведены тягово-энергетические испытания этих вагонов, во время которых выяснилось, что научные прогнозы и предположения разработчиков оказались ошибочными. Испытания показали, что в одинаковых условиях работы у вагонов «Яуза» с ТИСУ по сравнению с серийными вагонами метро модели 81-717/714 с реостатно-контактной системой управления (РКСУ) расход электроэнергии на тягу увеличился на 7,5%, а тормозные пути со скоростей 40-90 км/ч возросли на 8-15% (т.е. снизилась безопасность движения). Во время испытаний выявилось и мешающее влияние пульсаций тягового тока, создаваемых низкочастотным импульсным регулированием, на работу систем СЦБ и связи метрополитена.

Столь неожиданные результа-

ты обескуражили. Стало очевидно, что идти по пути установки на новые вагоны метро дорогостоящих и неэффективных тиристорно-импульсных «пускателей» вместо простых и дешевых пусковых реостатов – дело бесперспективное, а динамично развивающийся Московский метрополитен в тот период уже испытывал острую нехватку в подвижном составе. Поэтому выпуск вагонов типа «Яуза» был приостановлен и продолжилось изготовление хорошо знакомых эксплуатационникам вагонов метро серийных моделей 81-717/714 образца 1975 г.

Кстати, в этот же период был проведен эксперимент, когда современные по конструкции, более комфортабельные и удобные для пассажиров новые вагоны типа «Яуза» оснастили асинхронным тяговым приводом импортного производства. На опытные вагоны поочередно установили асинхронные тяговые двигатели и инверторы фирм «Альстом» (Великобритания) и «Хитачи» (Япония). Их сравнительные испытания показали, что оба привода дают практически одинаковые тягово-энергетические показатели, которые существенно превосходят показатели отечественного привода с ТИСУ и серийных вагонов метро с РКСУ. В результате у фирмы «Альстом» были закуплены 40 комплектов асинхронного привода на общую сумму 14 млн. евро, которыми оснастили вагоны легкого наземного метро типа «Русич».

На фоне очевидных успехов, полученных на вагонах метро с асинхронным приводом и инверторными системами управления ИНСУ, неудача с ТИСУ требует четкого объяснения. На наш взгляд, отрицательными результатами тиристорно-импульсного регулирования тяги получились только потому, что эту идею неправильно использовали. Попробуем разобраться в этом.

Системы ИНСУ и ТИСУ – сестры-близнецы, а асинхронный тяговый привод всегда стремился в точности копировать характеристики тягового привода постоянного тока, поскольку общепризнано, что

для тяги он является идеальным. Поэтому испытания системы ТИСУ с коллекторными двигателями и системы ИНСУ с асинхронными двигателями теоретически должны были дать одинаковый результат. Но этого не случилось.

Дело в том, что эти системы имеют принципиальные отличия. Одно из них – в пользу ИНСУ, а другое – в пользу ТИСУ. В пользу ИНСУ – отсутствие коллектора у асинхронных тяговых двигателей. Это удобно для эксплуатации (не надо периодически менять щетки), но мало увеличивает надежность по сравнению с коллекторными двигателями постоянного тока. Коллектор, как один из главных узлов тяговых машин, настолько тщательно отработан практикой эксплуатации, что на его долю, например, у двигателей вагонов метро и электропоездов приходится только 2-3% порч из общего числа их выходов из строя. Но отсутствие коллектора дает асинхронному двигателю весомые преимущества в тяговых характеристиках в зоне высоких скоростей движения, поскольку у него нет «ограничений по коллектору», которыми в этой зоне страдает коллекторный двигатель.

В пользу ТИСУ – наличие коллектора у тяговых двигателей постоянного тока. Коллектор, как простой и надежный электромеханический коммутатор тока в обмотках тяговой машины, имеет исключительно высокий КПД, гораздо более высокий, чем КПД инвертора асинхронного привода. Именно поэтому правильно спроектированный привод с ТИСУ теоретически должен был дать на 5% более высокие тягово-энергетические показатели, чем асинхронный тяговый привод. Но на вагонах «Яуза» он проиграл асинхронному приводу около 20%, проиграл и морально устаревшему электроприводу серийных реостатных вагонов. Стало очевидным, что причина здесь не в коллекторе, а в чем-то другом, гораздо более существенном.

Тщательный анализ показал, что главной причиной столь неожиданных отрицательных результатов, полученных при испытаниях метро

вагонов, типа «Яуза», оказался «старый» тяговый двигатель. Конструкторы, внедряя современную силовую электронику для безреостатного пуска, сами двигатели по характеристикам оставили «реостатными». Разработчики не стали создавать принципиально новые тяговые двигатели с характеристиками оптимальными для импульсного безреостатного пуска, а приспособили тиристорно-импульсный «пускатель» ТИСУ к старым «реостатным» двигателям. И получили... отрицательный результат.

Второй причиной проигрыша оказалось то, что разработчики ТИСУ слепо копировали старые законы регулирования, применяемые в тяге с РКСУ. Это внесло дополнительную лепту в сумму проигрыша. Иначе говоря, разработчики безреостатной ТИСУ «играли на поле реостатной тяги» и, конечно, ей проиграли по всем статьям.

Следует отметить, что, приступив несмотря на отрицательные результаты испытаний к выпуску вагонов с ТИСУ, их изготовители надеялись, что новые вагоны продемонстрируют надежную работу и окупят перерасход электроэнергии на тягу за счет сокращения затрат на техническое обслуживание и ремонт. Но эксплуатация показала, что новый тяговый привод дает в три раза больше отказов, чем старый, и этим создает большие проблемы для электродепо.

Как уже отмечалось, к перечисленным «неудобствам» ТИСУ неожиданно добавилась проблема мешающего влияния пульсаций тягового тока на работу локомотивной сигнализации и связи метрополитена. Импульсные системы во время своей работы генерируют в рельсовые цепи мощные импульсы тока, которые необходимо подавлять с помощью фильтров и дросселей. Установленные на вагонах «Яуза» мощные многотонные LC-фильтры и сглаживающие дроссели не смогли снизить эти пульсации до приемлемого уровня, при котором отсутствуют мешающие воздействия. Однако своей большой массой они внесли дополнительную лепту в снижение

техничко-экономической эффективности новых вагонов – ведь вместо них можно было бы дополнительно перевозить в каждом вагоне 15-20 пассажиров.

Возникает вопрос, а может ли безреостатный тяговый привод постоянного тока с ТИСУ обеспечить вагонам метро и электропоездам на 15-20% лучшие тягово-энергетические показатели, чем при реостатном регулировании, и на 5% опередить вагоны с асинхронным приводом? Ответ только один – да может, если он будет оснащен форсажными тяговыми двигателями, специально предназначенными для импульсных систем.

То, что тяговые двигатели для безреостатных импульсных систем должны отличаться от «реостатных» и быть форсажными известно давно. Автор настоящей статьи об этом писал еще в 1978 г. в «Трудах ВНИИ вагоностроения» (выпуск № 35) и в книге «Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями», (М., «Транспорт», 1986 –229с). Но до казуса, происшедшего с новыми вагонами метро, на это как-то не обращали внимания, считая форсаж не стоящей внимания выдумкой. И это вполне закономерно – подобный путь проходит практически каждая новая идея, отрицательная устоявшиеся представления. Так происходит и с идеей форсажного пуска коллекторных тяговых двигателей при импульсном регулировании, которая при лабораторных испытаниях продемонстрировала свою значимость и показала, что форсаж неэффективен без ТИСУ, как и ТИСУ несостоятельна без форсажа.

На рис. 1 представлены скоростные и тяговые характеристики двух модификаций тягового двигателя ДК-117 (вагона метро), предназначенных для обычного (ДК-117А) и форсажного (ДК-117Ф) пуска.

Особенность тягового двигателя ДК-117 состоит в том, что он не имеет ограничений по коммутации в зоне высоких скоростей движения. Реактивная ЭДС при выходе на характеристику максимально ослабленного поля $\beta = 0,28$ (частота вращения 2100об/мин) у этого

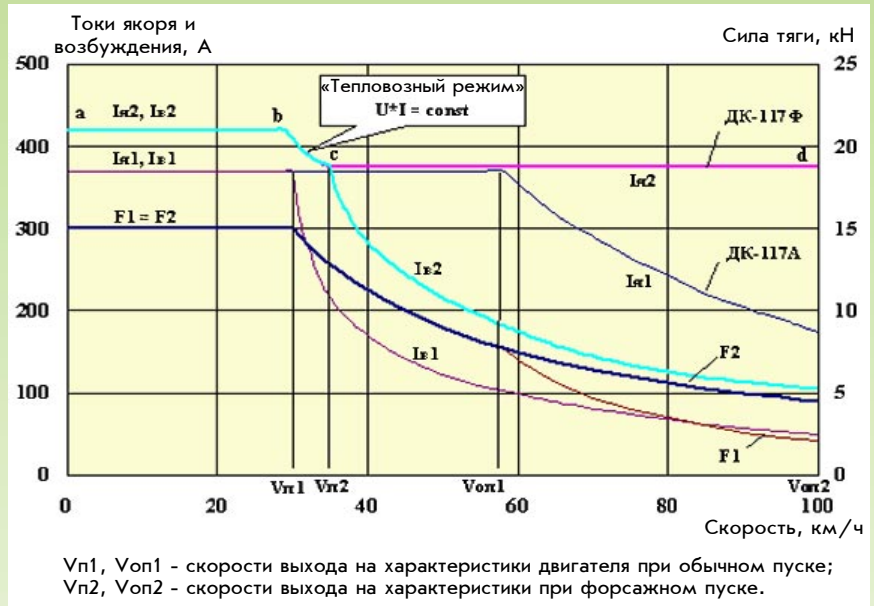


Рис. 1. Форсажный пуск тягового двигателя при импульсном регулировании тяги

двигателя составляет около 40% от допустимой. Возможность поддерживать в режимах тяги постоянную мощность за счет ослабления поля при частотах вращения более 2100об/мин ограничена у двигателя ДК-117 потенциальными условиями на коллекторе. Снять это ограничение по коллектору, не получив при этом побочных отрицательных эффектов, можно. Для этого нужно увеличить эффективный воздушный зазор под главными полюсами двигателя ДК-117 с 3,5 до 5 мм. При этом произойдет «рассыщение» его магнитной системы и скорость выхода на естественную характеристику полного поля возрастет – примерно с 30 до 35 км/ч. У модернизированного таким образом двигателя ДК-117Ф существенно повысится коэффициент устойчивости к образованию круговых огней, улучшатся регулировочные свойства. Появится возможность за счет ослабления поля от 100 до 28% поддерживать постоянную мощность тяги в диапазоне скоростей 35-100км/ч. Однако, если при этом пусковой ток ДК-117Ф оставить на прежнем уровне (370А), то существенно уменьшится тяга двигателя и ухудшатся динамические и тягово-энергетические показатели вагона в зоне низких скоростей (0-35 км/ч).

Скомпенсировать потерю силы

тяги в зоне низких скоростей можно, применив форсажный пуск тяговых двигателей ДК-117Ф (см. рис.1). Для этого на участке а-б пусковой ток якоря повышается с 370 до 420А и поддерживается постоянным, а на участке b-c он уменьшается по закону постоянной мощности ($U_{я} \times I_{я} = const$), аналогично регулированию тяги тепловоза. В зоне низких скоростей (0-35км/ч) форсаж тока полностью компенсирует потерю силы тяги двигателя ДК-117Ф, вызванную «рассыщением» его магнитной системы.

При проектировании электрической тяги или модернизации режимов ее работы нужно учитывать ограниченность мощности тяговых сетей. Форсаж тяги и тока тяговых двигателей в зоне низких скоростей не окажет отрицательного воздействия на режимы работы ограниченных по мощности тяговых сетей, поскольку в этом режиме ток, потребляемый приводом из контактной сети, всегда меньше максимально допустимого и нарастает от нуля до максимума по линейному закону.

Как видно на рис.1, сила тяги F2 форсажного двигателя ДК-117Ф в диапазоне скоростей 0-58км/ч равна тяге F1 серийного реостатного двигателя ДК-117А. При скоростях более 58км/ч F2 становится

ся больше F_1 , а при максимальной скорости 100км/ч она уже вдвое превосходит силу тяги двигателя ДК-117А. Реактивная ЭДС ДК-117Ф в этом режиме (точка d) составляет 65% от максимально допустимой величины.

Очевидно, что снятие ограничений по коллектору за счет применения форсажа целесообразно только при импульсном безреостатном пуске тяговых двигателей, поскольку в этом случае отсутствуют потери энергии в пусковых реостатах. При реостатном пуске двигателей форсаж вызовет рост реостатных потерь и приведет к заметному повышению расхода электроэнергии на тягу. Поэтому его надо применять очень осторожно и расчетливо.

Форсажный пуск тяговых двигателей можно осуществлять по схемам, представленным на рис.2.

По схеме на Рис. 2, а форсажный пуск осуществляется с помощью двухплечего тиристорно-импульсного регулятора ДТИР. Она позволяет на участке а-б поддерживать ток возбуждения на уровне 1000А при токе якоря 370А ($I_b > I_a$), а затем ослаблять поле двигателей за счет уменьшения тока возбуждения с 1000А до 370А при постоянном токе якоря. В этой схеме форсируется только ток возбуждения двигателей, а их коллекторы не нагружаются током форсажа.

В схеме рис. 2,б форсируются оба тока – ток якоря и ток возбуждения. После завершения «тепловозного режима» пуска (точка с на рис.1) мощный импульсный регулятор напряжения Т1 вместе со сглаживающими дросселями (на схемах не показаны) шунтируется контактором КШ и в работу вступает маломощный многофункциональный импульсный регулятор тяги и мощности РТМ, потери в котором на порядок меньше, чем в инверторе. Он не только ослабляет поле тяговых двигателей со 100 до 28%, поддерживая реализуемую ими мощность на максимальном уровне, но и обеспечивает повышенную надежность их работы, защищая своим быстрым действием от скачков напряжения в контактной сети и других нестационарных режимов. Иначе гово-

ря, форсажный тяговый привод способен обеспечить высокую надежность работы и идеальные тяговые характеристики электроподвижного состава во всем диапазоне скоростей.

В условиях ограниченных по мощности тяговых сетей асинхронный тяговый привод не может реализовать такие же совершенные, как у форсажного привода, тяговые характеристики, поскольку заметная часть его мощности (около 5%) теряется в инверторе и сглаживающих дросселях и не поступает к тяговым двигателям. Поэтому при одинаковой мощности сила тяги, развиваемая асинхронным приводом в зоне скоростей 35-100км/ч, будет примерно на 5% меньше, чем сила тяги, у форсажного привода постоянного тока. Это непременно скажется на динамике и тягово-энергетических показателях подвижного состава в пользу форсажного привода.

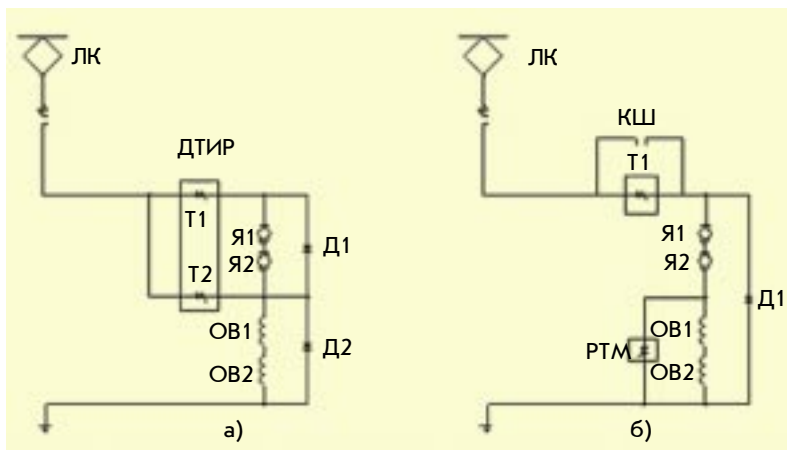
Тягово-энергетические испытания вагонов метро с асинхронным приводом показали, что этот привод обеспечил сокращение расхода электроэнергии на тягу (по сравнению с серийным реостатным приводом с коллекторными двигателями) именно за счет большей тяги в диапазоне скоростей 58-100км/ч по сравнению с резко уменьшающейся при этом тягой F_1 нефорсированных коллекторных двигателей ДК-117А. Форсажный привод, имеющий большую чем асинхронный тягу в этом диапазо-

не скоростей, обеспечит большее сокращение расхода электроэнергии и гораздо раньше окупит первоначальные затраты на свое приобретение.

Испытания форсажных режимов работы тяги постоянного тока было проведено на макете с двигателями мощностью 30кВт. Было установлено, что в пределах до скорости выхода двигателей на естественную характеристику полного поля можно с помощью импульсных регуляторов осуществлять режимы форсажного пуска двигателей и, таким образом компенсировать потери момента, вызванные ростом воздушного зазора, за счет увеличения пускового тока. При этом во время форсажа потреблять повышенную мощность из сети не требуется, а импульсные регуляторы в этот период работают как формирователи тяговых характеристик.

Форсаж тепловозных двигателей в авиации и автомобилестроении применяется уже десятки лет и на самых ответственных режимах. Настало время применить форсаж и в электрической тяге. Форсажный пуск тяговых двигателей при импульсном регулировании – вот палочка-выручалочка, способная выручить неэффективные без него ТИСУ, снять «ограничения по коллектору» с коллекторного тягового двигателя, сделать его работу более надежной и вернуть тяговому приводу постоянного тока его законные преимущества. Кроме

Рис. 2. Схемы форсированного пуска тяговых двигателей



того, форсаж снимает и ключевую для высокооборотных асинхронных тяговых двигателей проблему несовершенства отечественных редукторов. Ее решение требует технологий, которых у нас пока нет, а в форсажный тяговый привод уже встроена «электрическая бесступенчатая коробка передач».

Инвертор асинхронного привода полностью снимает проблему «ограничений по коллектору». Однако плата за это чрезмерно высока: повышенный расход электроэнергии на тягу, снижение КПД тягового привода, надежности самого инвертора и управляемой им тяги. Инвертор обслуживает асинхронный двигатель во всех диапазонах скоростей и нагрузок, работая без «передышек», напряженно и непрерывно. При этом в нем выделяются большие потери электроэнергии. Так, например, суммарные потери энергии в коллекторном тяговом двигателе вагона метро составляют около 25 кВт (в том числе, потери энергии на коллекторе – около 1 кВт). В аналогичном по мощности режиме работы асинхронного привода вагона метро потери энергии в его инверторе составили около 30 кВт. С точки зрения потерь электроэнергии инвертор является «пятым двигателем» асинхронного тягового привода. Именно поэтому КПД асинхронного привода вагона метро типа «Яуза» в испытаниях составил 82,7%, а КПД привода этого же вагона с коллекторными двигателями на 4,5% больше – 87,2%.

Форсаж решает проблему коллектора дозировано. В зависимости от «глубины форсажа» условия работы коллектора и его надежность повышаются ровно настолько, насколько это технико-экономически обосновано. При этом проблема «ограничений по коллектору» снимается именно в необходимом скоростном диапазоне и именно с требуемым «запасом прочности и надежности».

Разумеется, за преимущества форсажа надо платить. Поскольку его выполняет силовая электроника, пропуская через себя форсированный ток, то в зависимости от «глубины форсажа» установленная

мощность силового электронного оборудования возрастает, т.е. разгружая электромеханический коллектор, мы повышаем нагрузку на силовую электронику. На практике это реализуется без установки дополнительного оборудования, поскольку силовые тиристоры и транзисторы выполняются сегодня на тысячи ампер, и повышенные нагрузки от форсажа им не опасны.

Форсажный тяговый привод способен придать новые качества не только вагонам метро, но и электровозам постоянного тока. Оснащенные им пассажирские электровозы станут, как и тепловозы, «локомотивами постоянной мощности». Существенно улучшатся их тяга и повысится КПД в зоне высоких скоростей движения, возрастет производительность. Пассажирские электровозы с форсажным тяговым приводом смогут уверенно водить поезд со скоростями до 200 км/ч, имея мощный и исключительно надежный «следающий» рекуперативно-реостатный тормоз с самовозбуждением тяговых двигателей, не зависимый от наличия напряжения в контактной сети. Существенно повысится безопасность движения. Не менее значимый положительный эффект форсажный тяговый привод принесет на электропоезда постоянного тока и скоростные двухсистемные электропоезда с двигателями пульсирующего тока. Резко возрастут их тяговые и тормозные усилия, приводы станут более надежно, более экономично и с более высоким КПД, чем у электропоездов с асинхронной тягой, работать в диапазоне скоростей 150-250 км/ч.

Форсажный тяговый привод практически не имеет температурных ограничений. Он может быть выполнен на силовой электронике отечественного производства и способен надежно работать при низких температурах. К тому же он в разы дешевле асинхронного по стоимости и в ремонте, на порядок проще по поиску неисправностей и техническому обслуживанию. Он может поставляться в модификации «сцепляемый с реостатным подвижным составом» и, разумеется, является более при-

емлемым для российских железных дорог.

Покупка у иностранных фирм тысяч комплектов исключительно дорогостоящего асинхронного электрооборудования потребует значительных финансовых затрат и приведет к установлению технологической зависимости от них российских железных дорог. С учетом технического задела, нарабатанного отечественными учеными, форсажный тяговый привод быстро даст технико-экономический эффект, оправдает вложенные в него средства и повысит конкурентоспособность отечественного подвижного состава до уровня западных аналогов. На ближайшие 30-40 лет форсажный привод сможет полностью удовлетворить реальные потребности электрической тяги железных дорог России.

Разработку форсажной тяги целесообразно выделить в специальную инвестиционную программу, к которой следует привлечь предприятия электронной и электротехнической промышленности, имеющие опыт работы в электрической тяге, такие как ОАО «Электровыпрямитель», ОАО «Силовые машины»-«Электросила», АЭК «Динамо», предприятия Трансмашхолдинга, ОАО «РАТЕП», а также специалистов вузов и научных институтов. Первый этап этой программы - разработка модификаций тяговых бесконтактных регуляторов токов возбуждения, их внедрение на электропоезда и электровозы постоянного тока. На втором этапе необходимо разработать высокооборотные тяговые двигатели, специально предназначенные для безреостатной тяги, а также сверхнадежные импульсные регуляторы напряжения на отечественной силовой электронике. На третьем этапе будет отработан сам форсажный тяговый привод в различных модификациях: для пассажирских и грузовых, обычных и скоростных электровозов и электропоездов постоянного тока, а также для электровозов и электропоездов с двухсистемной тягой. Вся работа по внедрению форсажного тягового привода может быть завершена в течение 3-4 лет.