

К ИСТОРИИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МЕТРОВАГОНОСТРОЕНИЯ

В. А. Мнацаканов, генеральный директор ООО «ТОМАК, ЛТД», член-корр. Российской инженерной академии, к. т. н.

В статье рассматривается история развития отечественных модификаций вагонов для метрополитена. Дан анализ их конструктивных и тягово-энергетических показателей и сделан вывод о превосходстве метропоездов российских фирм над аналогами иностранных компаний.

В советский период работы Московского метрополитена (1935–1991 гг.) было разработано и запущено в серийное производство семь типов вагонов метро (А, Г, Д, Е, модели 81-717/714, 81-715/716 и 81-718/719) и несколько модификаций вагонов типа Е и мод. 81-717/714. Все они оснащались тяговыми приводами постоянного тока, поскольку в СССР был накоплен большой опыт применения коллекторных тяговых двигателей на пригородных электропоездах.

Габариты тоннеля определяют ширину и высоту вагонов метро. А их длина, как правило, составляет 19–20 м, поскольку должна быть кратна длине платформ. Поэтому габариты вагонов метро разных типов и их максимальная вместимость примерно одинаковы. А их показатели назначения (скорость сообщения, провозная способность, расход электроэнергии на тягу) являются производными от массы тары, мощности тягового электропривода и характеристик тяговых двигателей.

Вагоны типа А с тяговыми двигателями ДМП-151 были первыми вагонами Московского метрополитена. Кузов, тележки и элементы механического оборудования вагонов А разработал Мытищинский машиностроительный завод (ММЗ), а тяговое электрооборудование – завод «Динамо» (г. Моск-

ва). Двигатели ДМП-151 имели большую мощность (151 кВт), поскольку в метропоездах из четырех вагонов типа А половина были моторными массой 51,7 т, а половина безмоторными, прицепными массой 36,3 т (средняя масса тары вагона 44 т). Масса тягового электрооборудования моторного вагона типа А составляла около 15 т. Из них 9 т – масса тяговых двигателей, а 6 т – масса регулирующей аппаратуры.

Вагоны типа Г имели среднюю массу тары 43,7 т (почти как у вагонов А) и выпускались на ММЗ с 1939 по 1955 г. Они были очень надёжными в эксплуатации. Их коллекторные тяговые двигатели ДК-102Г массой около 1,5 т имели большие запасы по реактивной эдс и потенциальным условиям на коллекторе. Даже в самых напряжённых режимах работы (при максимальной скорости движения) коммутация на коллекторах была «тёмной», они практически не искрили. Начиная с вагонов типа Г все вагоны метрополитена, выпущенные в СССР, были моторными (табл. 1).

При разработке вагонов типа Д (выпуск с 1955 г.) была поставлена задача – максимально сократить массу тары. По сравнению с вагонами типа Г она была сокращена на 7,5 т (17 %) и составила 36,2 т. А масса тягового дви-

гателя типа ДК-104Д уменьшилась на 790 кг (50 %) по сравнению с массой тягового двигателя вагона типа Г.

При разработке вагонов типа Е (выпуск с 1963 г.) массу тары удалось сократить еще на 3,7 т (10 %). Она составила около 32,5 т. Вагоны Е (модель 81-710) поставлялись не только на внутренний рынок. В 1973 г. их (под маркой Е_{чс}) стали готовить к поставке на строящийся с участием советских специалистов Пражский метрополитен, который поставил условие – модернизировать тяговое электрооборудование: применить силовую электронику и обеспечить возможность автоматического электрического торможения вагонов Е_{чс} с максимальной скоростью 90 км/ч (на серийных вагонах Е автоматический тормоз применялся со скоростей менее 60 км/ч, а в диапазоне скоростей 90–60 км/ч машинист управлял электрическим тормозом вручную).

Для решения этой сложной задачи необходимо было внедрить на вагоны автоматические регуляторы токов возбуждения тяговых двигателей. Эту работу поставщик тягового привода (завод «Динамо») поручил научной группе института МИИТ под руководством доцента, к. т. н. А. И. Хоменко. Ею были разработаны тиристорно-импульсные регу-

Таблица 1

Тип (модель) вагона	Год выпуска	Средняя масса тары, т	Тип тяговой машины	Номинальная мощность, кВт	Масса тягового двигателя, кг	Удельная пусковая мощность, кВт/т	Удельный расход электроэнергии на тягу*, Втч/ткм
А, мот/безм.	1935	51,7/36,3	ДМП-151	151	2340	7,2	78**
Г	1946	43,7	ДК-102Г	83	1490	9,3	72**
Д	1955	36,2	ДК-104Д	73	700	8,9	73**
Е, Е _{чс} (81-710)	1963, 1973	32,5	ДК-108А, ДК-116А	68/72	630	8,8	62***
Е _и , Е _{ип} (81-710)	1972, 1975	32,5	ДК-108А	68	630	8,8	61**** без рекуп.
81-717, 81-540	1977, 1997	33,8	ДК-117А	110	740	9,9	68
81-717М/714М	1979	33,8	ДК-117А	110	740	9,9	66
Е _{нв} (81-710)	1980	32,5	ДК-108А	68	630	8,8	–
И 81-715/716	1982	31	ДК-117А	90	740	8,7	73 без рекуп.
81-718/719	1983, 1991	33,8	ДК-117А	110	740	10	67 без рекуп.

*На перегоне 1700 м при скорости сообщения 48 км/ч и стоянке 25 с /1/

**Экспертная оценка

***На 1500 м при скорости сообщения 42,3 км/ч и стоянке 25 с

****На 1500 м при скорости сообщения 45 км/ч и стоянке 25 с

ляторы токов возбуждения РТ-300/300А массой 130 кг на отечественных тиристорах. Это позволило автоматизировать процесс электрического торможения вагонов, сократить тормозные пути, повысить безопасность движения.

Была сделана попытка применить регуляторы РТ-300/300А в режимах тяги. Но она потерпела неудачу: во время работы регуляторов с частотой 100 Гц возникали режимы «деления частоты» и в рельсовых цепях появлялись гармонические составляющие тягового тока с частотами 50–300 Гц. Они оказывали мешающее влияние на работу систем безопасности АРС-АЛС, работающих на частотах 75–275 Гц. Поэтому от работы РТ-300/300А в режимах тяги пришлось отказаться. Так на экспортных вагонах $E_{\text{чс}}$ (и на вагонах $E_{\text{жз}}$ для внутреннего рынка) появились две системы регулирования токов возбуждения: одна – реостатно-контактная (работала в режимах тяги), а другая – тиристорно-импульсная (работала в режимах электрического торможения). Это было неэкономичным решением.

В это же время (1967–1975 гг.) другая научная группа института МИИТ, под руководством д. т. н., проф. В. С. Хвостова, по договору с Московским метрополитеном разрабатывала другие модификации вагонов типа Е (для их последующей модернизации в электродепо). Было переоборудовано, испытано и запущено в опытную эксплуатацию с пассажирами два опытных состава: из вагонов типа $E_{\text{и}}$ и вагонов типа $E_{\text{нр}}$.

На метропоезде из вагонов $E_{\text{и}}$ тиристорно-импульсные системы управления (ТИСУ) обеспечивали в режимах тяги импульсный безреостатный пуск и импульсное регулирование токов возбуждения тяговых двигателей, а в режимах электрического торможения – импульсное регулирование токов возбуждения и тормозных реостатов. Рекуперация электроэнергии при электрическом торможении не предусматривалась.

Силовая электрическая схема вагонов $E_{\text{и}}$ была более экономичной, чем у вагонов $E_{\text{и}}$ и $E_{\text{чс}}$. За счёт безреостатного пуска тяговых двигателей она сэкономила до 5 % от расхода электроэнергии на тягу по сравнению с вагонами $E_{\text{и}}$ и $E_{\text{чс}}$.

Еще более экономичной оказалась силовая схема, примененная на вагонах $E_{\text{нр}}$. В ней наряду с безреостатным пуском было применено рекуперативно-реостатное торможение тяговых двигателей с отдачей электрической энергии торможения в контактную сеть. Тяговые двигатели на время торможения становились генераторами и превращали механическую энергию тормозящихся вагонов в электроэнергию. С учётом рекуперации экономия электроэнергии на тягу вагонов $E_{\text{нр}}$ в опытной эксплуатации с пассажирами составила 17,3 % по сравнению с вагонами $E_{\text{и}}$ и $E_{\text{чс}}$ [1]. Это стало большим успехом нового вида электрического торможения – рекуперативного. Стало известно, какой может быть экономия электроэнергии,

если оборудовать тяговые подстанции метрополитена устройствами приёма рекуперированной энергии. Следует отметить, что ТИСУ на вагонах $E_{\text{и}}$ и $E_{\text{нр}}$ были выполнены на отечественных диодах и тиристорах. Это тоже было большим достижением.

В процессе разработки и испытаний метропоездов из вагонов $E_{\text{и}}$ и $E_{\text{нр}}$ с ТИСУ стало ясно, что тяговые двигатели на этих вагонах должны быть другими по мощности и по тяговым характеристикам, чем на серийных вагонах (E и 81-717/714) с реостатным регулированием тяги. Поэтому в МИИТе под руководством д. т. н., проф. В. С. Хвостова в 1973 г. началась подготовка кандидатской диссертации по выбору мощности тягового двигателя для вагонов метрополитена с ТИСУ [2]. В ней был сделан вывод, что для таких вагонов требуется резкое (в 2 раза) повышение номинальной и пусковой мощности тягового двигателя (до 160 и 190 кВт соответственно). Было установлено, что коллекторные тяговые двигатели для ТИСУ тяги должны проектироваться как форсажные тяговые двигатели с «высоколежачими» характеристиками. Это позволит в тех же габаритах повысить пусковую мощность коллекторного тягового двигателя, снять ограничения по коллектору (по потенциальным условиям и реактивной эдс) и добиться практически такой же надёжности его работы и такой же регулируемости, как у асинхронного тягового двигателя [1, 2]. С проведёнными в диссертации тяговыми, энергетическими и технико-экономическими расчётами был ознаменен главный конструктор завода «Динамо» к. т. н. А. А. Рабинович.

На новых вагонах метро модели 81-717/714 (выпуск с 1977 г.) номинальная мощность тяговых двигателей типа ДК-117А была повышена до 110 кВт, т. е. в 1,5 раза по сравнению с двигателями ДК-116А (72 кВт) серийных вагонов $E_{\text{жз}}$, а пусковая мощность – на 30 %, со 100 до 130 кВт. Столь значительный рост мощности, потребляемой тяговыми двигателями из контактной сети, потребовал принципиально нового подхода к их проектированию: учитывать ограниченность мощности тяговой сети и необходимость эффективно и бережно использовать её в эксплуатации [1, 2].

В 1977 г. были проведены тягово-энергетические испытания вагонов мод. 81-717/714 с максимальной нагрузкой. На них, как и на $E_{\text{чс}}$, были установлены регуляторы РТ-300/300А. На перегоне 1700 м была достигнута скорость сообщения 48 км/ч (средняя скорость с учётом времени стоянки на станции 25 с). Удельный расход электроэнергии на тягу вагонов составил 68 Втч/ткм. Для того времени это был хороший результат. Вагоны мод. 81-717/714 оказались настолько надёжными в эксплуатации, что в 1980 г. их наряду с ММЗ начал выпускать и Ленинградский вагоностроительный завод «Вагонмаш».

В реальной эксплуатации скорость сообщения вагонов мод. 81-717/714 составляет 42–43 км/ч, а удельный расход электроэнер-

гии на тягу – 50 Втч/ткм. Среднесуточное заполнение вагона – около 50 пассажиров. Расход электроэнергии на перемещение одного вагона (т. е. 50 пассажиров) на расстояние 13 км (среднестатистическая дальность поездки пассажира Московского метро) составляет около 25 кВтч. Значит на перевозку одного пассажира Московского метро расходуется 0,5 кВтч электроэнергии (это 2,5 руб. в ценах 2015 г.). С учётом электроэнергии, затрачиваемой на спуск и подъём пассажира на эскалаторах, на вентиляцию, освещение станций и переходов, цифра расхода электроэнергии на перевозку одного пассажира увеличится примерно вдвое (до 1 кВтч).

В 1979 г. удалось решить проблему мешающего влияния импульсных регуляторов РТ-300/300А на системы АРС-АЛС, возникшую в 1973 г. на вагонах $E_{\text{чс}}$. Для этого были разработаны и испытаны на модернизированном вагоне мод. 81-717М (№ 9068) принципиально новые ступенчато-импульсные регуляторы токов возбуждения РТМ-350/350 [1]. Они были внедрены на юбилейных метропоездах из вагонов мод. 81-540.7/541.7, построенных в 2003 г. к 300-летию Санкт-Петербурга. Проведённые ОАО «ВНИИ вагоностроения» тягово-энергетические испытания юбилейного шестивагонного метропоезда, оснащённого регуляторами РТМ-350/350, показали, что удельный расход электроэнергии на тягу по сравнению с серийными вагонами мод. 81-717/714 сократился на 3 % (с 68 до 66 Втч/ткм). А испытания юбилейного метропоезда на мешающее влияние регуляторов РТМ-350/350 на работу систем АРС-АЛС подтвердили, что оно отсутствует.

В 1980 г. под руководством д. т. н., проф. В. Д. Тулупова на кафедре электрический транспорт МЭИ была проведена работа по установке на вагон типа Е системы независимого возбуждения тяговых двигателей. В модернизированном вагоне $E_{\text{нв}}$ обмотки возбуждения тяговых двигателей питались от отдельного статического преобразователя напряжения на тиристорах. Это позволило обеспечить электрическое рекуперативное торможение вагона $E_{\text{нв}}$ практически до полной остановки. Однако широкого применения на вагонах метро система независимого возбуждения тяговых двигателей не получила.

В соответствии с государственным планом развития метровагоностроения на ММЗ в 1974 г. были построены опытные вагоны метро типа И (модель 81-715/716) с кузовом из алюминиевых сплавов. Предполагалось, что это позволит увеличить срок службы и сократить расход электроэнергии на тягу облегчённых вагонов. Для вагонов типа И была разработана новая ТИСУ на тиристорах. К сожалению, тяговые двигатели на вагонах типа И были «старыми», спроектированными для реостатного пуска.

Первые тягово-энергетические испытания вагонов типа И, проведённые в 1983 г., показали, что они имеют такие же показатели разгона и торможения, как и у вагонов мод. 81-717/714. Иначе и быть не могло, поскольку

ку на вагонах И тиристорные регуляторы работали просто как пускатели «реостатных» тяговых двигателей ДК-117 и никаких новых качеств и преимуществ тяге вагонов они не давали. Поэтому разгон до 80 км/ч (при напряжении сети 850 В) на вагонах мод. 81-717/714 обеспечивался за 33,9 с, а на вагонах типа И – за 34,3 с [1].

Реостатное торможение у вагонов мод. 81-717/714 и типа И тоже было одинаковым: тормозной путь с 60 км/ч – 127 м. Удельный расход электроэнергии на тягу вагонов типа И (при напряжении сети 750 В) составил 73 Втч/ткм, т. е. на 7,3 % больше, чем у мод. 81-717/714 (68 Втч/ткм). Это было результатом применения на вагонах И неудачной схемы импульсного регулирования токов возбуждения тяговых двигателей, которая на 10 % понижала напряжение на якорах тяговых двигателей.

С 1974 по 1987 г. проводилась доработка опытных вагонов типа И. Были изготовлены три их модификации. В 1987–1988 гг. провели тягово-энергетические испытания третьей модификации. Результаты испытаний показали, что и доработанные вагоны И никаких преимуществ по сравнению с вагонами мод. 81-717/714 не имеют. Вагоны мод. 81-717/714 и были запущены на ММЗ в серийное производство в 1977 г., чтобы прикрыть затянувшуюся почти на 15 лет разработку вагонов типа И. Такой долгий путь разработки сложных технических устройств был характерен для СССР. Предприятия не были заинтересованы в выпуске новой техники. Поэтому в СССР с 1935 по 1991 г. на разработку каждого нового типа вагона метро уходило в среднем от восьми до десяти лет. Это привело к техническому отставанию отечественных вагонов метро от мирового уровня.

Модернизацией вагонов метро занимались научные группы учебных институтов, в основном МИИТ и МЭИ. Их силы и возможности были ограничены. Работы велись практически «на общественных началах» и на энтузиазме. Было очевидно, что развитие в стране силовой электроники требует масштабного, государственного подхода к внедрению новой техники на подвижной состав метрополитена. Поэтому к решению проблем внедрения были подключены институт ВНИПТИ кранового и тягового оборудования, а также специально созданный в 1973 г. в институте ВНИИ вагоностроения отдел городского электрического транспорта. Их учёные и специалисты внесли заметный вклад в разработки новых вагонов метрополитена. В них впервые начал зарождаться системный научный подход к проектированию тяги вагонов метрополитена [1,2].

Разработанный научной группой проф. В. С. Хвостова метропоезд из вагонов типа И передан в эксплуатацию с пассажирами в 1973 г. В 1975 г. был передан в эксплуатацию с пассажирами и метропоезд из вагонов Еир. Он был настолько «доведён до ума», что Харьковский и Ташкентский метрополитены сделали ММЗ заказ на поставку вагонов

мод. 81-718/719. Их кузова, тележки и тяговые двигатели – те же, что и у вагонов мод. 81-717/714, а силовая электроника – на базе ТИСУ вагонов Еир. На Харьковский метрополитен было поставлено 25, а на Ташкентский 20 вагонов мод. 81-718/719.

В [1] проанализированы практически все выполненные по состоянию на 1985 г. разработки отечественных вагонов метро с силовой электроникой. Представлены и зарубежные вагоны метрополитенов Японии, США, ФРГ, Великобритании, Франции, Швеции и Финляндии с тяговыми двигателями постоянного тока и с асинхронными тяговыми двигателями, управляемыми инверторами.

В СССР в 1970–1985 гг. предпринимались попытки разработать асинхронные тяговые приводы для вагонов метрополитена на инверторах из силовой электроники отечественного производства (тиристорах и диодах). Однако они не обеспечили требуемую надёжность ввиду несовершенства силовой электроники. Поэтому внедрение асинхронного тягового привода на отечественных вагонах метро не состоялось до появления силовых IGBT транзисторов.

В 1988 г. было выпущено распоряжение № 1299р Совета Министров СССР «Об ускорении работ по созданию новых вагонов метро». Ими стали вагоны модели 81-720/721 («Яуза»). Поставщик тягового электрооборудования (завод «Динамо») принял решение установить на вагоны «Яуза» испытанный на вагонах типа И тяговый привод с ТИСУ. Оно оказалось неудачным. Следовало установить на вагоны «Яуза» хорошо себя зарекомендовавшую ТИСУ вагонов Еир и мод. 81-718/719. В результате ТИСУ коллекторными тяговыми двигателями, как новая технология управления тягой, исчезла с отечественных вагонов метрополитена. Следует сказать, что завод «Динамо» вёл свою техническую политику как бесконтрольный монополист. Это его и погубило: завод не вписался в складывавшуюся конкурентную среду, потерял заказы и обанкротился.

После длительных доработок (в 1991–1994 гг.) было начато производство, а в 1996 г. первый опытный 6-вагонный состав из вагонов «Яуза» был передан Московскому метрополитену для тягово-энергетических испытаний. Они были проведены институтом ВНИИЖТ МПС в 1997 г. Оказалось, что вагоны «Яуза» имеют такой же удельный расход электроэнергии на тягу, как у вагонов типа И – 73,3 Втч/ткм. Это на 7,8 % больше, чем у серийных реостатных вагонов мод. 81-717/714 выпуска 1977 г.

При изучении причин перерасхода электроэнергии на вагонах «Яуза» по сравнению с серийными вагонами мод. 81-717/714 выяснилось, что они те же, что и на вагонах типа И: система регулирования возбуждения понижала напряжение на тяговых двигателях по отношению к напряжению сети и этим снижала мощность тяги. Несмотря на неудачу с расходом электроэнергии на тягу, ожидалось, что бесконтактная ТИСУ вагонов

«Яуза», столь длительно разрабатывавшаяся, обеспечит им более высокую надёжность в эксплуатации по сравнению с вагонами мод. 81-717/714. Поэтому было принято решение выпустить опытную партию вагонов «Яуза».

В 1999 г. первый 7-вагонный метропоезд из вагонов «Яуза» был передан в опытную эксплуатацию с пассажирами. Всего было изготовлено и запущено в эксплуатацию на Московском метрополитене восемь 7-вагонных составов из вагонов «Яуза». Статистика эксплуатации показала, что надёжность работы вагонов «Яуза» в 2–3 раза ниже надёжности работы серийных вагонов мод. 81-717/714. Поэтому в 2003 г. руководством Московского метрополитена было принято решение больше не заказывать вагоны «Яуза» с ТИСУ. Так закончились продолжавшиеся более 25 лет разработки вагонов типа И и «Яуза» с ТИСУ, которые принесли стране огромный финансовый ущерб.

Следует отметить, что вагоны мод. 81-718/719 с ТИСУ эксплуатируются по сей день. Они признаны специалистами Харьковского метрополитена более надёжными и более энергоэффективными в эксплуатации по сравнению с вагонами мод. 81-717/714.

В 1998 г., практически сразу после получения неудовлетворительных результатов испытаний вагонов «Яуза», генеральным директором ЗАО «Метровагонмаш» (бывший ММЗ) Ю. А. Гулько было принято решение отказаться от услуг завода «Динамо» и установить на вагоны мод. 81-720А/721А асинхронный тяговый привод производства фирмы «Альстом» (Великобритания). Это было «дорогое удовольствие». Стоимость комплекта тягового электропривода для одного вагона составила 420 тыс. долл. США. В 1998 г. цена вагона «Яуза» была 870 тыс. долл., а комплект его тягового электропривода с ТИСУ стоил 150 тыс. долл. (17 % от стоимости вагона «Яуза»). И всё же, под давлением неудач с вагонами «Яуза», это решение было принято. Оно оказалось дальновидным. С него началась эра внедрения асинхронного тягового привода на вагоны метрополитена России. Фактически начался выход из того тупика, в котором к концу XX века оказалось отечественное метровагоностроение.

Вагоны мод. 81-720А/721А с тяговым приводом «Альстом» были первыми вагонами метро, построенными не в СССР, а в России. Их построили сравнительно быстро, менее чем за два года. Это было большим достижением ЗАО «Метровагонмаш», если учесть, что за столь короткий срок пришлось кардинально поменять развеску, установку электрооборудования и весь электромонтаж вагонов мод. 81-720/721, чтобы приспособить их к системе трёхфазного асинхронного тягового привода.

Сразу вслед за первым важным решением Ю. А. Гулько принял ещё одно: пригласил на ЗАО «Метровагонмаш» команду отечественных специалистов по асинхронному тяговому приводу. Им была поставлена задача – «русифицировать» комплект асинхронного

Таблица 2

Модель вагонов/поставщик тягового оборудования	Год выпуска	Средняя масса тары вагона, т	Тип асинхронного тягового двигателя	Номинальная мощность двигателя, кВт	Масса тягового двигателя, кг	Удельная пусковая мощность, кВт/т	Уд. расход электроэнергии на тягу*, Втч/ткм
81-720/721 з-д Динамо	1996	35	ДК-117 пост. тока	110	740 з-д Динамо	7,3	73,3
81-720А/721А Альстом	1999	35,5	4EFA 1832B	160	801 Альстом	9,2	60
81-720Х/721Х Хитачи	2000	35	EFO-K60	160	700 Хитачи	10,8	59
81-740/741 Альстом	2003	48,2	4EFA 1832B	160	801 Альстом	7,5	41**
81-720/721 Метровагонмаш	2003	35,2	ТАД 280 М4У2	170	800 з-д Динамо	10,8	59
81-553/554/555 Шкода (Казань)	2005	32,7	ML 3844 К/4	170	660 Шкода	10	62
81-760/761 Метровагонмаш (Ока)	2010	37	ДАТЭ-170-4У2	170	805 Лысьва	10	60
81-556/557/558 Шкода (НеВа)	2012	26,7	MLU 3839 К/4	167	577 Шкода	11,3	60
81-760А/761А/763А Метровагонмаш	2014	34,3	ДАТЭ-170-4У2	170	805 Лысьва	9	62***
81-760/761/763 Хитачи (Охта)	2015	33,4	EFO-K60	170	700 Хитачи	10,3	60***

*Перегон 1700 м, скорость сообщения 48 км/ч, стоянка 25 с, нагрузка 8 чел./м²

**Перегон 1700 м, скорость сообщения 42 км/ч, стоянка 25 с, нагрузка 6,6 чел./м²

***Экспертная оценка

Примечание: за 25 лет (1991–2015 гг.) в России разработано 10 новых типов вагонов.

тягового привода «Альстом». С этой задачей они полностью справились. И даже разработали свой, более совершенный вариант отечественного асинхронного тягового привода для вагонов метро. В результате на ЗАО «Метровагонмаш», впервые в России, была реализована возможность производить и механическое, и тяговое электрооборудование вагонов метро на территории одного предприятия, т. е. обеспечивать практически полный цикл производства (за исключением производства асинхронных тяговых двигателей). Это стало большим достижением отечественного метровагоностроения.

Тягово-энергетические испытания вагонов мод. 81-720А/721А, оснащённых асинхронными двигателями (АД) номинальной мощностью 160 кВт, управляемыми инверторами напряжения на IGBT транзисторах, показали, что при стандартной скорости сообщения 48 км/ч на стандартном перегоне 1700 м с 25-секундной остановкой удельный расход электроэнергии на тягу вагонов с максимальной нагрузкой 8 чел./м² (18,5 т) составил 60 Втч/ткм (табл. 2). Это на 12 % меньше, чем у вагонов мод. 81-717/714 и на 18% меньше, чем у «Язуз» с двигателями ДК-117А мощностью 110 кВт.

При тщательном изучении составляющих экономии электроэнергии на вагонах мод. 81-720А/721А выяснилось, что из 12 % экономии 4,5 % – это экономия не за счёт асинхронного тягового привода, а за счёт уменьшения сопротивления движению вагонов [3]. Сопротивление движению вагона с АД существенно уменьшилось по сравнению с серийным вагоном мод. 81-717/714 (и вагоном

«Яуза»), поскольку значительная часть его электрооборудования была размещена в одном большом контейнере (компоновочная схема). А на вагонах мод. 81-717/714 и «Яуза» электрооборудование размещено в десятках отдельных ящиков, подвешенных под вагоном. Они создают завихрения воздуха и повышают сопротивление движению вагонов. Этот эффект исчез при компоновочной схеме размещения электрооборудования.

Ввиду положительных результатов испытаний вагонов мод. 81-720А/721А было принято решение закупить 40 комплектов тягового привода с АД у фирмы «Альстом» для оснащения ими 40 вагонов мод. 81-740/741 («Русич») Бутовской линии Московского метрополитена. Их общая стоимость составила 14 млн EUR. Особенность вагонов «Русич» состоит в том, что они сочленённые, имеют длину 26–28 м и массу тары 46–48 т. Из трех тележек каждого вагона одна не обмоторена. Поэтому мощности закупленных комплектов тягового привода с АД оказалось для них недостаточно. В результате ускорение при разгоне метропоезда «Русич» с 66 % обмоторенных осей составило 0,92 м/с², а замедление – 1 м/с² (вместо 1,3 м/с² на вагонах мод. 81-720А/721А со 100 % обмоторенных осей).

Для создания конкуренции при закупках асинхронного привода предложение о поставке комплекта электрооборудования с АД было направлено фирме «Хитачи» (Япония). Причём было поставлено условие, чтобы конструктивно и по техническим параметрам комплекты приводов с АД обеих фирм были взаимозаменяемы. Это условие конструкторами ЗАО «Метровагонмаш» было

выполнено. Тягово-энергетические испытания вагонов мод. 81-720Х/721Х с тяговым приводом фирмы «Хитачи» показали, что их тяговые, тормозные и энергетические показатели практически совпали с показателями вагонов мод. 81-720А/721А с приводом фирмы «Альстом» (см. табл. 2). Корректировка алгоритмов тяги-торможения вагонов мод. 81-720А/721А и мод. 81-720Х/721Х выполнялась с участием автора.

Внедрение асинхронного тягового привода производства ЗАО «Метровагонмаш» состоялось на вагонах метро мод. 81-720/721 в 2003 г. Тягово-энергетические испытания этих вагонов с приводом ЗАО «Метровагонмаш» показали, что их тяговые и тормозные характеристики, а также результаты по расходу электроэнергии на тягу ни в чём не уступают результатам, полученным на вагонах с приводами фирм «Альстом» и «Хитачи».

В 2002 г. на ЗАО «Вагонмаш» (Санкт-Петербург), который стал главным конкурентом ЗАО «Метровагонмаш», начались работы по внедрению асинхронного тягового привода фирмы «Шкода» (Чехия) на вагоны метро мод. 81-553/554/555, предназначенные для поставки на строящийся метрополитен г. Казани (введён в эксплуатацию в 2005 г.). Особенностью этой разработки явилось то, что согласно техническим требованиям Казанского метрополитена четырёхвагонный метропоезд формировался в составе 2ГМ+П+М (два головных моторных, промежуточный безмоторный и промежуточный моторный вагоны). То есть 75 % осей состава были моторными, а 25 % – безмоторными. При этом ставилась задача – на метропоезде

Таблица 3

Показатель	Вагоны «НеВа» (7 вагонов) 5М+2П	Вагоны Хитачи (6 вагонов) 4М+2П	Преимущество «НеВы», %
Конструктивные показатели			
Длина состава, м	136	135	–
Масса тары метропоезда, т	190	230	17
Масса тары на 1 м длины, т/м	1,4	1,7	18
Средняя масса вагона, т	27,1	38,3	30
Вместимость поезда при 8 ч/м ² , пасс.	1860	1556	20*
Масса тары на 1-го пассажира, кг	102	148	31
Масса поезда при 8 ч/м ² , т	320	339	5,6
Моторных осей в поезде, %	71,4	66,7	7
Удельная пусковая мощность, кВт/т	11,8	8,9	32
Длина вагона по торцевым стенкам, м	19,25	22	–
Ширина вагона, м	2,67	3,15	–
Высота вагона, м	3,655	3,865	–
Ширина колеи, м	1,524	1,435	–
Тягово-энергетические показатели			
Максимальное ускорение, м/с ²	1,35	0,92	46
Максимальное замедление, м/с ²	1,4	0,97	44
Скорость сообщения, км/ч	48 (на 1700м)	44,5 (на 1700м)	8**
Уд. расход электроэнергии на тягу, Втч/ткм	58	не более 62	6,5***

*Провозная способность линии с вагонами «НеВа» на 20 % больше, чем с Хитачи

**Скорость сообщения на линии с вагонами «НеВа» на 8 % выше

***Вагоны «НеВа» на 6,5 % энергоэффективнее, чем вагоны Хитачи

с безмоторным вагоном обеспечить тягово-энергетические показатели, не уступающие показателям полномоторных метропоездов, производства ЗАО «Метровагонмаш».

Проектные тяговые и тормозные расчёты, выполненные ООО «ТОМАК, ЛТД», показали, что этого можно добиться, если применить новые алгоритмы тяги-торможения, увеличить реализуемый моторными вагонами коэффициент тяги и перевести их частично в «электровозный» режим, когда каждый моторный вагон тянет не только себя, но и часть максимально загруженного безмоторного вагона. Теоретически это удалось. Но на практике полностью внедрить новые алгоритмы тяги на вагонах мод. 81-553/554/555 не получилось.

Следующим «ходом» ОАО «Метровагонмаш» стало внедрение в 2010 г. «своего» асинхронного тягового привода на вагоны мод. 81-760/761. Оно тоже было успешным. Однако за счёт установки на вагоны мод. 81-760/761 кондиционеров салона масса каждого вагона возросла примерно на 1,5 т, а средняя масса тары вагона составила около 37 т.

При массе тары вагона метро 25 т и его среднесуточном заполнении 50 чел./вагон (как на Московском и Петербургском метрополитенах) каждый пассажир платит за свою перевозку и перевозку 500 кг конструкции вагона. При массе тары вагона 30 т пассажир платит за себя, за 500 кг конструкции

вагона и за «багаж», составляющий 100 кг (5 т/50 чел.). При массе тары 35 т «багаж» пассажира составляет уже 200 кг (10 т/50 чел.), что очень много. Поэтому масса тары вагона экономически очень важна.

В 2012 г. ООО «Вагонмаш» построило инновационный метропоезд мод. 81-556/557/558 («НеВа») с асинхронным тяговым приводом фирмы «Шкода», который имеет среднюю массу тары вагона 26,7 т [4]. У метропоезда «НеВа» 66 % моторных осей (составность 4М+2П): из шести вагонов четыре – моторные, и два – безмоторные. За счёт безмоторных вагонов масса метропоезда «НеВа» снижена на 10 т. Проектные тягово-энергетические расчёты, выполненные ООО «ТОМАК, ЛТД», показали, что и в этой облегчённой составности (с 66 % моторных осей как у «Русича») метропоезд «НеВа» может добиться таких же тягово-энергетических показателей, как у метропоездов мод. 81-760/761 из полномоторных вагонов (ускорение и замедление – 1,3 м/с², удельный расход электроэнергии на тягу – 60 Втч/ткм).

При наладке тягового электрооборудования, при подготовке и проведении тягово-энергетических испытаний метропоезда «НеВа» специалисты ООО «ТОМАК, ЛТД» обеспечивали их авторский надзор и научно-техническое сопровождение. Поэтому результаты испытаний «НеВы» полностью совпали с проектными тяговыми расчётами [4].

Конкурентная среда, возникшая в метровагоностроении России, сыграла большую положительную роль. В ответ на метропоезд «НеВа» ОАО «Метровагонмаш» разработало облегчённый метропоезд из вагонов мод. 81-760А/761А/763А с промежуточными безмоторными вагонами, с кондиционированием пассажирского салона и со сквозным проходом. По информации, размещённой на сайте ЗАО «Трансмашхолдинг», средняя масса тары вагона метропоезда (в составности 4М + 2П) составит 34,3 т, а его максимальное ускорение при разгоне, ввиду наличия безмоторных вагонов – 1 м/с².

На метропоездах из вагонов мод. 81-760/761/763 («Охта»), которые планируется поставить Петербургскому метрополитену, готовится дальнейшее сокращение средней массы тары вагона. По предварительным расчётам она составит около 33 т. Такую заметную сокращению массы тары вагона будет способствовать не только облегчённая составность (4М+2П). Асинхронный привод для моторных вагонов «Охта» будет поставлен фирмой «Хитачи» (Япония), которая планирует сократить массу тягового привода и при этом обеспечить ускорение метропоезда облегчённой составности на высоком уровне.

Фирма «Хитачи» является одним из ведущих мировых производителей вагонов метро. Она готовит поставку вагонов для строящегося метрополитена г. Хошимин (Вьетнам), который планируется ввести в эксплуатацию

в 2017 г. В табл. 3 представлены сравнительные показатели инновационного метропоезда «НеВа» и метропоезда, готовящегося для поставки на метрополитен г. Хошимина.

Сегодня ускорения и замедления метропоездов приблизились к максимальному уровню, ограниченному условиями комфорта и сцеплением колеса с рельсом. Рельсовая технология на «традиционном метрополитене» реализует свои предельные возможности по провозной способности и скорости перевозки пассажира на 90 % [5]. Встаёт естественный вопрос – по какому пути пойдёт дальнейшее развитие этой, насчитывающей уже более 150 лет, транспортной технологии.

Могут быть созданы метропоезда на магнитной «подушке» и проблема сцепления колеса с рельсом будет решена. Это может стать реальностью в ближайшие 10–15 лет. Может быть полностью автоматизирован процесс управления метропоездами (безлюдная технология). Это тоже реально в ближайшей перспективе [6]. Перечисленные мероприятия требуют очень больших капиталовложений. Но даже они способны увеличить скорость поездки на метро (из расчёта «от двери до двери») с сегодняшних 20–22 лишь до 25 км/ч. А в XXI веке, чтобы транспортная технология «традиционный метрополитен» могла «выжить», нужно увеличить скорость поездки на метро как минимум вдвое, до 50 км/ч.

Принципиальная невозможность в будущем существенно повысить скорость передвижения по городу на строящихся сегодня линиях метро – это глобальная проблема для строителей метрополитена во всём мире. Её надо решать, и решать сегодня. Но об этом пока не задумываются. И продолжают экстенсивно развивать подошедшую к своему пределу транспортную технологию. Она сама активно этому сопротивляется: создаёт «пробки» в тоннелях и на станциях, с каждым новым километром снижает безопасность перевозок и т. п. Поэтому уже сегодня нужно думать о будущем – о возможности модернизировать строящиеся сегодня линии и закладывать её в проекты.

«Проблема (невозможности существенно повысить скорость поездки по городу на метро) не может быть решена на том же уровне, на котором она возникла. Нужно стать выше этой проблемы, поднявшись на следующий уровень», – так учил нас А. Эйнштейн.

В нашем случае «подняться на следующий уровень» значит перейти на новый технологический уровень. Например, заменить технологию «традиционный метрополитен» (ТМ) технологией «скоростной мобильный метрополитен» (СММ) [7].

В строительстве СММ вдвое дешевле, чем ТМ, вдвое сокращает сроки строительства и в 1,5 раза снижает эксплуатационные затраты. А значит, он может быть самоокупаемым и строиться на кредитные средства. Кроме того, СММ делает тоннели активным элементом транспортной системы и позволяет пользоваться метрополитеном даже инвалиду-колясочнику (рис. 1).



Рис. 1

Основное отличие СММ от ТМ в том, что платформы его наземной станции расположены на одном уровне с окружающим её пешеходным тротуаром. Во время остановки метропоезда пол вагонов позиционируется на уровень пешеходного тротуара. Поэтому ступеньки и эскалаторы пассажиру не нужны.

Безопасность и эффективность транспортной технологии СММ проверены во время испытаний инновационного метропоезда «НеВа» [4] с составлением протоколов проверки. Доказано, что новый принцип движения метропоезда СММ безопасен и удобен для пассажиров, вызывает в разы меньшую транспортную усталость от поездки и экономит около 50 % расхода электроэнергии на тягу.

Выводы

- К 80-летию Московского метрополитена отечественное метрогастроение подошло более чем достойно:

- на внутреннем рынке идёт жёсткая конкуренция за заказы на поставку вагонов метро;

- отечественные метропоезда превосходят метропоезда иностранных компаний и конкурентоспособны на мировом рынке;

- отечественные метропоезда приблизились к максимально реализуемым показателям по провозной способности и скорости сообщения, но почти не увеличили скорость поездки на метро из расчёта «от двери до двери».

- Скорость поездки «от двери до двери» можно увеличить на 100 %, если заменить строительную технологию «традиционный метрополитен» на технологию «скоростной мобильный метрополитен». При этом:

- сроки проектирования и строительства уменьшатся вдвое;

- стоимость строительства 1 км линии уменьшится вдвое;

- затраты электроэнергии на поездку уменьшатся вдвое;



- транспортная усталость от поездки уменьшится вдвое, а удобство поездки многократно возрастёт.

- При проектировании новых линий ТМ сегодня следует закладывать в проект необходимость и способ их модернизации в будущем.

Ключевые слова

Метропоезд, удельная пусковая мощность, тягово-энергетические испытания.

Список литературы

1. Гаврилов Я. И., Мнацаканов В. А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. М., Транспорт, 1986, 230 с.
2. Мнацаканов В. А. Исследование тяговых параметров и регулировочных характеристик системы тягового привода вагонов метрополитена. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 1979.
3. Мнацаканов В. А. Сопротивление движению вагонов метрополитена и расход электроэнергии на тягу. // Метро, 2000, № 5–6.
4. Мнацаканов В. А. Инновационный метропоезд «НеВа». Тягово-энергетические испытания. // Метро и тоннели, 2014, № 1.
5. Мнацаканов В. А. Предельные возможности метрополитена как транспортной системы. // «Метро и тоннели», 2002, № 3.
6. Гольянский А. П. О повышении пропускной способности и привлекательности метрополитена. // «Транспорт Российской Федерации», 2013, № 4.
7. Мнацаканов В. А. Как построить метрополитен в крупном городе России. // Метро и тоннели, 2010, № 1.

Для связи с автором

Мнацаканов Валерий Александрович
kamotltd@gmail.com

