

## **Сопrotивление движению вагонов метрополитена и расход электроэнергии на тягу.**

Метрополитены в городах являются крупнейшими потребителями электроэнергии. Ввиду непрерывного удорожания энергоресурсов и их увеличивающейся доли в стоимости поездки пассажира вопросы экономии электроэнергии на вагонах метро становятся все более актуальными. Экономия электроэнергии, расходуемой на собственные нужды вагона, не является сегодня первостепенной задачей, поскольку ее доля составляет всего около 2% от расхода электроэнергии на тягу.

Экономия электроэнергии на тягу вагонов метро достигается за счет использования безреостатных систем управления тяговым приводом, применения на вагонах в качестве служебного рекуперативного торможения, использования энергосберегающих технологий и рациональных режимов ведения поездов. На вагонах с безреостатными системами управления весомым резервом экономии электроэнергии на тягу является экономия за счет сокращения потерь на преодоление сопротивления движению.

Расход электроэнергии на тягу вагонов метро с безреостатными системами управлением складывается из следующих составляющих:

- потери в тяговых двигателях;
- потери в импульсных преобразователях;
- потери на преодоление сопротивления движению;
- потери в тормозных резисторах.

В таблице 1 приведены доли вышеуказанных потерь в процентах к общему расходу электроэнергии на тягу:

**Таблица 1**

Тип вагона	Удельный расход электроэнергии, Вт ч/ т км	В тяговых двигателях и преобразов., %	На преодоление сопротивл. движению, %	В тормозных резисторах, %
81.720/721	67.1	15	27	58
81.720А/721А	58.44	15	25	60

Представленные данные базируются на результатах проведенных ВНИИЖТ тягово-энергетических испытаний вагонов метрополитена мод. 81.720/721 с тиристорно-импульсными системами управления и тяговыми двигателями постоянного тока и вагонов мод. 81.720А/721А с асинхронными тяговыми двигателями, управляемыми инверторами напряжения /1,2/. Эти испытания проводились в одинаковых условиях: в ночное время, в тоннеле, в режиме челночного движения максимально загруженных трехвагонных составов по перегону длиной 1700м со скоростью сообщения 48км/ч при 25с остановках на станциях. Напряжение в контактной сети в режимах тяги составляло 850В; в

качестве служебного использовался реостатный тормоз. Масса состава из вагонов мод. 81.720/721 составляла 174.27т, а из вагонов мод. 81.720А/721А - 171.7т. Удельный расход электроэнергии на тягу у вагонов мод. 81.720/721 составил 67.1 Вт ч/т км, а у вагонов мод. 81.720А/721А - 58.44 Вт ч/т км, т.е. оказался на 12.9% меньшим  $/67.1 - 58.44/ : 67.1 = 0.129$ .

Но не все 12.9% экономии энергии были получены за счет асинхронного привода. Заметная доля экономии была получена ввиду сокращения сопротивления движению вагонов мод. 81.720А/721А за счет рациональной компоновки и размещения на них элементов комплекта тягового электрооборудования.

На вагонах мод. 81.720/721 тяговое электрооборудование конструктивно выполнено многоблочным и подвешено под вагоном в 8-10 отдельных блоках. Соединение блоков в общую силовую схему осуществлено внешним электромонтажем, проложенным в специальном соединительном коробе, проходящем вдоль всего вагона. На вагонах мод. 81.720А/721А тяговое электрооборудование выполнено по **компоновочной схеме** и сосредоточено в трех основных блоках: тяговый инвертор с коммутационной и защитной аппаратурой, сетевой сглаживающий индуктор и тормозной резистор. Это позволило упростить электромонтаж и обойтись без соединительного короба. Отсутствие короба, большого числа отдельных блоков и разветвленного электромонтажа устранило множество дополнительных завихрений воздуха, возникавших в подвагонной части вагонов мод. 81.720/721, и значительно уменьшило основное сопротивление движению вагонов мод. 81.720А/721А в зоне высоких скоростей.

На рис.1 представлены зависимости основного удельного сопротивления движению для вагонов мод. 81.720/721 и вагонов мод. 81.720А/721А. Их сравнение показывает, что с ростом скорости движения составляющая ветровой нагрузки в общем сопротивлении движению у вагонов мод. 81.720/721 растет быстрее, чем у вагонов мод. 81.720А/721А. При средней скорости 75км/ч /скорость, при которой вагоны во время испытаний проезжают 60-65% всей 1700м дистанции/ сопротивление движению вагонов мод. 81.720А/721А составляет всего 70% от сопротивления движению вагонов мод. 81.720/721. Это заметно сокращает расход электроэнергии на тягу.

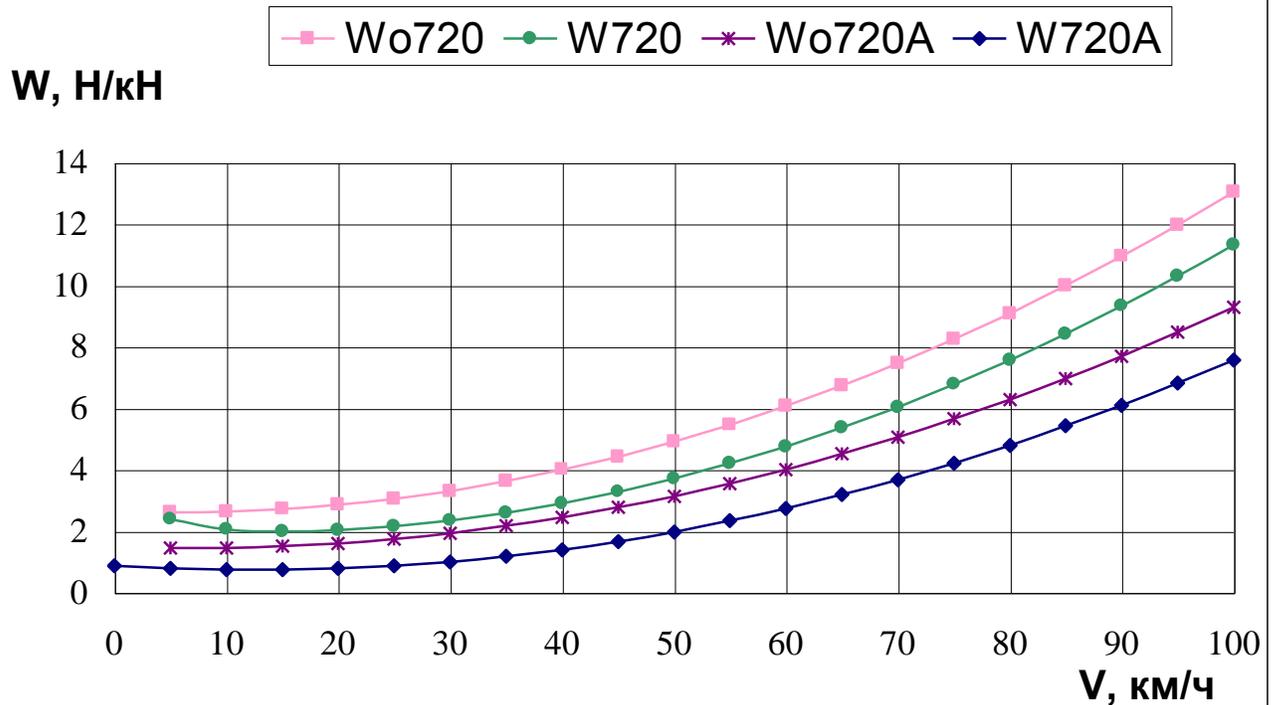


Рис. 1 Зависимость удельного сопротивления движению от скорости.

Wo720 - в режиме выбега, /1/,

$$W_{o720} = 2,651366 - 0,013428 \times V + 0,001174 \times V^2 \quad \text{Н/кН};$$

W720 - при движении под током, /1/,

$$W_{720} = 1,89045 + 2,89855/V - 0,023614 \times V + 1,175778 \times 10^{-3} \times V^2 + 1,19753 \times 10^{-8} \times V^3 \quad \text{Н/кН};$$

Wo720A- в режиме выбега, /2/,

$$W_{o720A} = 1,4835 - 0,0119 \times V + 0,0009 \times V^2 \quad \text{Н/кН}; \quad (1)$$

W720A - при движении под током, /по нашим расчетам/,

$$W_{720A} = 0,88 - 0,023 \times V + 0,0009 \times V^2 \quad \text{Н/кН}; \quad (2)$$

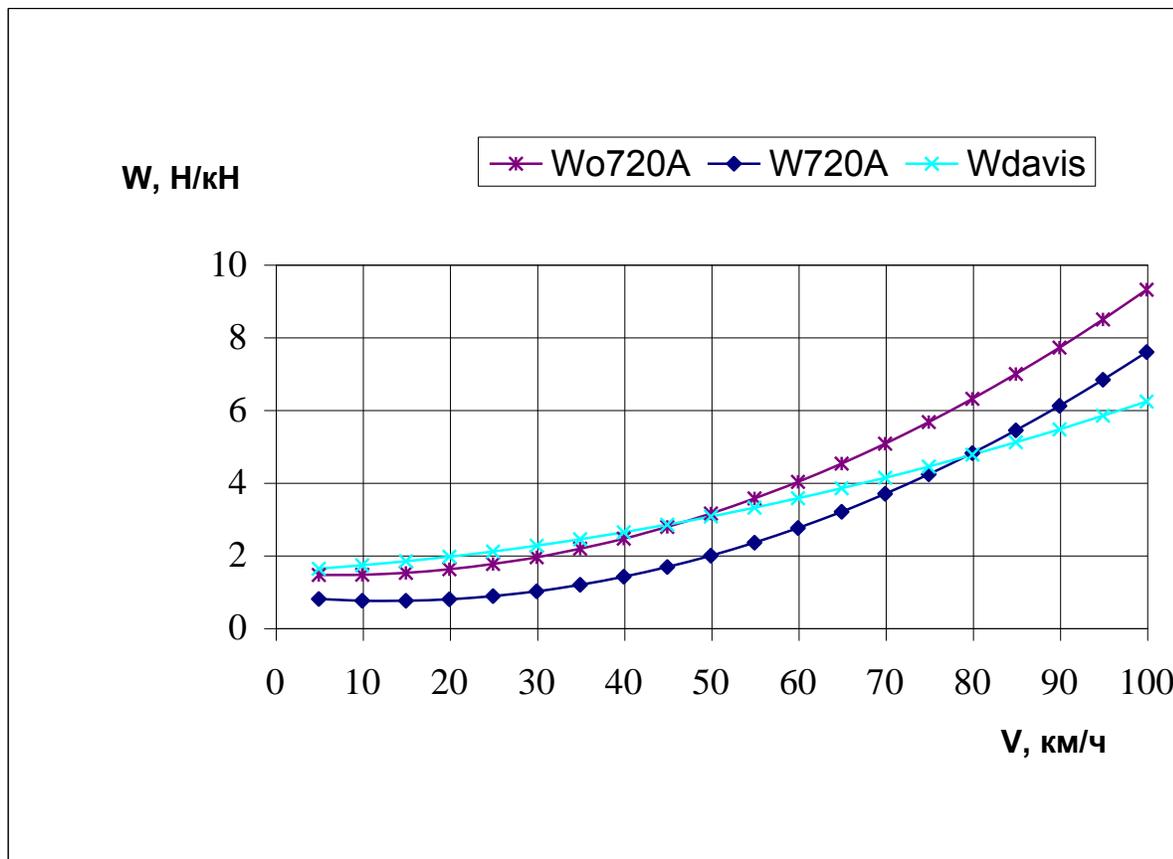
Согласно данным таблицы 1 при движении по перегону длиной 1700м со скоростью сообщения 48км/ч на преодоление основного сопротивления движению вагоны мод. 81.720/721 расходуют 18.12 Вт ч/т км / 67.1 × 0,27/, а вагоны мод. 81.720А/721А - 14.61 Вт ч/т км / 58.44 × 0,25 /, т.е. на 19% меньше. Повышенное у вагонов мод. 81.720/721 по сравнению с вагонами мод. 81.720А/721А сопротивление движению приводит к дополнительному расходу электроэнергии на тягу в размере 3.51 Вт ч/ т км /18.12- 14.61/, что составляет 5.2% /3.51: 67.1 = 0.052/ от общего расхода электроэнергии на тягу этих вагонов.

Расчеты показывают, что из 5.2% повышения расхода электроэнергии на тягу 0,7% приходится на преодоление момента, вызываемого трением щеток о коллекторы тяговых машин. А остальные 4.5% приходятся на преодоление повышенной ветровой нагрузки и на преодоление паразитных тормозных моментов, например, таких как повышенное трение в дисковых тормозах и пр. Поэтому можно

ожидать, что применение компоновочной схемы размещения электрооборудования и устранение паразитных тормозных моментов позволит на вагонах мод. 81.720/721 сократить удельный расход электроэнергии на тягу на указанные 4.5%, т. е. на 3 Вт ч/т км, с 67.1 до 64.1 Вт ч/т км.

На рис.2 представлены зависимости основного удельного сопротивления движению вагонов мод. 81.720А/721А: для режима выбега /Wo720А/, рассчитанная по (1), для движения под током /W720А/, рассчитанная по (2), и кривая, рассчитанная по известной формуле Дэвиса для движения вагонов под током.

Рис.2 Сопротивление движению по формулам (1), (2) и Дэвиса.



Они практически совпадают в наиболее значимом диапазоне скоростей 70-90 км/ч. Но у современных вагонов метрополитена ввиду большего количества подвагонного оборудования большую роль играет ветровая нагрузка. Поэтому в тяговых расчетах предпочтительнее использовать формулы (1) и (2).

Выявленная в испытаниях экономия электроэнергии на вагонах мод. 81.720А/721А по сравнению с вагонами мод. 81.720/721 в размере 12.9%, на 5.2% состоит из экономии за счет сокращения сопротивления движению и на 7.7% из экономии за счет использования более эффективно регулируемых и более мощных тяговых двигателей.

Если на вагонах мод. 81.720/721 применить тяговые двигатели постоянного тока, специально спроектированные для форсированного пуска /3,4/, то указанные 7.7% будут полностью скомпенсированы. А расход электроэнергии на тягу у

вагонов с форсированными двигателями постоянного тока и импульсными преобразователями станет даже несколько меньшим, чем у вагонов мод. 81.720А/721А с асинхронными двигателями. Это объясняется тем, что на вагонах с приводом постоянного тока после завершения пуска тяговых двигателей, то-есть через 9-10с от начала движения, импульсные преобразователи постоянного тока в целях экономии электроэнергии могут быть зашунтированы контактором (это делается на вагонах мод. 81.720/721), а на вагонах с асинхронным тяговым приводом инверторы, работающие в тяге 30-35с, шунтировать принципиально нельзя.

Расчеты показывают, что удельный расход электроэнергии на тягу у вагонов мод. 81.720/721 с форсированными тяговыми двигателями и импульсными преобразователями при скорости сообщения 48 км/ч составит около 57 Вт ч/т км. Это на **16%** меньше, чем у серийных вагонов мод. 81.717/714 /68 Вт ч/т км/ с реостатным пуском. В существующих условиях эксплуатации, когда тяговые подстанции еще не оборудованы приемниками рекуперированной энергии, эти **16%** могут стать реальной экономией электроэнергии, компенсирующей затраты на внедрение на вагоны метрополитена систем безреостатного пуска тяговых двигателей.

#### Литература.

1. Отчет ВНИИЖТ. Тягово-энергетические испытания вагонов метрополитена мод. 81.720/721 с тиристорно-импульсной системой управления тяговым приводом постоянного тока, 1997.

2. ВНИИЖТ. Протокол испытаний по определению удельного расхода электроэнергии на тягу трехвагонным составом вагонов метрополитена мод. 81.720А/721А, 1999.

3. Мнацаканов В.А. Форсированный пуск тяговых двигателей при импульсном регулировании. Тр. ВНИИВ, 1978, вып.35, с.11-20.

4. Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. М., "Транспорт", 1986, 230с.