

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЩЕЙ СТРУКТУРЫ ТЯГОВОГО ПРИВОДА ТРОЛЛЕЙБУСА

Канд. техн. наук САФОНОВ А. И.

Белорусский национальный технический университет

Состояние окружающей среды в густонаселенных городах, а также рост затрат, связанных с эксплуатацией транспортных средств, оборудованных ДВС, требует разработки новой концепции общественного городского транспорта будущего. Несмотря на достигнутые успехи в создании более экономичных и экологически чистых систем привода ведущих колес городского общественного транспорта, оборудованного ДВС (введение стандартов ЕВРО-3, ЕВРО-4, альтернативного топлива), необходимость в нерельсовом городском электрическом транспорте становится все более острой.

Городской транспорт в целом, в том числе в соответствии с рядом нормативных регламентирующих документов, должен обеспечивать: высокую надежность и безопасность движения; предоставление максимума удобств для пассажиров при минимальной стоимости перевозок; высокую скорость сообщения и требуемый пассажирооборот; необходимую частоту и интервал движения на линии; хорошую маневренность и высокие тягово-динамические свойства при работе в общем транспортном потоке; минимальный шум, создаваемый подвижным составом; соблюдение требований к охране окружающей среды.

Очевидно, что соответствие данным требованиям неразрывно связано с эффективностью тягового привода, которая в свою очередь определяется правильным выбором его конструкции и схемы, а также алгоритмом управления.

Общая структура тягового привода, в том числе для городского нерельсового электрического транспорта, определяется прежде всего государственными и международными нормативными документами, регламентирующими нормы безопасности дорожного движения, а также ТУ завода-изготовителя на транспортное средство.

Анализ требований, указанных в этих документах, показывает, что одним из основных критериев, определяющих полную массу [1], количество осей с допустимой нагрузкой на них [2, 3], габариты [1], наличие сочленения

и маневренность [2, 3] транспортного средства категории М₃, а тем самым определяющих структуру тягового привода, является пассажироместимость. Кроме того, требования по удельной мощности [3] и скоростным качествам, оговариваемым в ТУ, предполагают правильный выбор тягового двигателя, а также формируют один из основных показателей эффективности пассажирского автомобиля – производительность.

Следует также учитывать не регламентируемые нормативной базой, но в то же время диктуемые современными тенденциями требования по: возможности автономного хода нерельсового городского электрического транспорта без контактных проводов, т. е. с использованием автономных источников энергии; рекуперации электроэнергии в тормозном режиме, а следовательно, экономичности; дополнительному удобству и скорости посадки и выхода пассажиров за счет использования низкопольных конструкций городского электрического транспорта; унификации с трансмиссией городских автобусов.

Рассмотрим влияние перечисленных выше требований на формирование общей структуры тягового привода нерельсового городского электрического транспорта более подробно.

Как уже отмечалось, производительность нерельсового городского электрического транспорта определяется прежде всего пассажироместимостью, так как влияние средней скорости на этот показатель крайне мало из-за относительно невысокой скорости общего транспортного потока в густонаселенных городах, а пассажироместимость в свою очередь необходимо рассматривать в рамках регламентируемых требований по нагрузке на ось, габаритам и маневренности транспортного средства. Так, в соответствии с [1] предельная осевая нагрузка на одиночную ось транспортных средств, к которым относятся и троллейбусы, составляет 115 кН. Она не должна быть менее 25 % от общей нагрузки для ведущей оси и менее 20 % – для передней оси [2, 3]. Максималь-

ная разрешенная полная масса в соответствии с [1] не должна превышать 21 т для двухосного троллейбуса, 28 т – для трех- и четырехосного и 32 т – для трех- и четырехосного сочлененного троллейбуса. Кроме того, максимально разрешенные габариты для троллейбуса составляют: по длине – 12 м для двухосного, 15 м – с числом осей более двух; 18 м – для сочлененного; по ширине – 2,55 м [1], а требования по маневренности предусматривают круговую траекторию маневра в пределах концентрических окружностей радиусов: 12,5 м – внешний и 5,3 м – внутренний. Из анализа приведенных требований следует, что в случае необходимости повышения пассажироместимости (до 110–130 чел.) целесообразно использование трехосных машин со сближенными мостами. При этом для соответствия требованиям по маневренности колеса третьего моста в них должны быть поворотными. Подобная конструкция третьего моста фирмы ZF использована, в частности, в троллейбусе Solaris Trollino 15 [4]. Однако существенно повысить пассажироместимость (до 150–170 чел.) можно, используя сочлененные конструкции троллейбусов, шарнирное соединение секций которых позволяет сохранять хорошие показатели маневренности и управляемости.

Современные сочлененные троллейбусы чаще всего выполняются трехосными. При таком исполнении ведущим является, как правило, второй мост. Широкое распространение таких схем объясняется прежде всего хорошей устойчивостью движения в тяговом режиме. Это обусловлено наличием растягивающих усилий в сцепном устройстве, стабилизирующих движение сочлененной машины. В последнее время за рубежом все чаще находят применение трехосные пассажирские транспортные средства с задним ведущим мостом (троллейбусы Skoda 25Tr Irisbus [5], New Flyer (Vancouver SETB) [6]). В этом случае двигатель обычно устанавливают в задней части полуприцепа и располагают над ним ряд сидений. Это позволяет наиболее рационально использовать пространство пассажирского салона, особенно для низкопольных транспортных средств, и существенно снизить шум в салоне. Обладая хорошей устойчивостью движения при торможении двигателем, такие автопоезда склонны к складыванию в режиме тяги, особенно при низком коэффициенте сцепления колес с дорогой. В связи с этим на них устанавливают сцепные устройства с системами противоскладывания, работающими преимущественно в автоматическом режиме.

Одним из недостатков трехосных сочлененных троллейбусов с одним ведущим мостом являются их низкие тягово-сцепные свойства, которые можно характеризовать коэффициентом сцепного веса k , отражающим ту часть полного веса троллейбуса, которая приходится на ведущий мост и может быть использована для обеспечения сцепных качеств и преодоления дорожного сопротивления. Следовательно, чтобы улучшить тягово-сцепные свойства троллейбуса, при большой полной массе транспортного средства должна быть большой и нагрузка на ведущий мост или, учитывая ограничения по предельной осевой нагрузке, большое число ведущих мостов.

У двухосных троллейбусов коэффициент сцепного веса при полной нагрузке составляет $k \approx 0,67$, что обеспечивает высокие тягово-сцепные свойства. Сочлененные троллейбусы с одним ведущим мостом имеют $k \approx 0,4$, т. е. более низкие тягово-сцепные свойства. Поэтому некоторые производители изготавливают сочлененные троллейбусы (Solaris Trollino 18 [4], Irisbus IVECO Cristalis ETB [7], мод. 333002 «Белкоммунмаш» [8], Hess Swiss Trolley 3 [9], APTS Phileas [6, 10]), имеющие два ведущих моста. При этом обеспечивается коэффициент $k \approx 0,6–0,8$, что по тяговым свойствам приравнивает эти машины к двухосным троллейбусам. Применение таких схем позволяет более рационально использовать вес машины для сцепления с дорогой и снизить за счет этого буксование (скольжение при торможении двигателем) колес. При автоматическом распределении заданной водителем тяговой или тормозной силы двигателя между ведущими мостами усилие в сцепке может быть снижено практически до нуля, что является идеальным случаем для устойчивости движения сочлененной машины, а использование двух двигателей вместо одного приводит к уменьшению размеров каждого из них, что упрощает вопросы компоновки машины. Очевидно, что такие схемы приводят к удорожанию троллейбуса, обусловленному использованием второго ведущего моста и необходимостью установки системы управления, синхронизирующей работу ведущих мостов. В связи с этим такие схемы на сегодняшний день распространены не очень широко, но являются наиболее перспективными из указанных и могут применяться при соответствующем уровне развития технологий проектирования и производства.

В связи с повышением комфорта входа и выхода пассажиров все шире стала приме-

няться низкопольная конструкция городского нереельсового электрического транспорта, претерпели изменения компоновки тяговых приводов и конструктивное исполнение ведущих мостов. Ведущие, управляемые и поддерживающие мосты городского нереельсового электрического транспорта, как правило, заимствованы у автобусов. Изначальное появление низкопольных автобусов, а затем и троллейбусов за несколько последних лет сделало большой вклад в увеличение пассажирского комфорта. Так, за последние три года количество единиц низкопольных автобусов и троллейбусов достигло 80 % парка пассажирских транспортных средств в Центральной Европе. Такие машины имеют уровень пола от 320 до 480 мм над уровнем дороги (рис. 1).

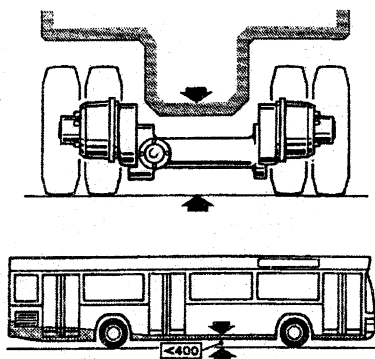


Рис. 1. Общий вид низкопольного городского транспорта

Помимо обеспечения комфортных условий это также позволяет пассажирам быстрее войти и выйти на остановках. В свою очередь снижение уровня пола в сочетании с конструктивными особенностями машин требует применения специальной конструкции ведущего моста и схемы привода в целом: смещения центрального редуктора главной передачи ведущего моста к одному из колес; применения бортовых редукторов с зубчатыми цилиндрическими косозубыми колесами вместо планетарных колесных редукторов; увеличения передаточного числа главной передачи моста; использования в некоторых моделях мостов хвостовика ведущего вала главной передачи, расположенного под различными углами к оси моста в зависимости от компоновки трансмиссии на машине. На рис. 2 приведены альтернативные концепции таких приводов европейских производителей ZF, Raba, MAN и др., учитывающие различные варианты взаимного расположения ведущего моста и тягового электродвигателя (ТЭД) с целью высвобождения дополнительного пространства.

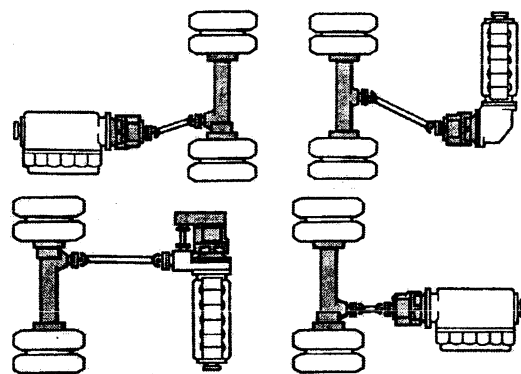


Рис. 2. Концепции тягового привода с порталным ведущим мостом для низкопольных троллейбусов

Один из вариантов конструкций ведущего моста для низкопольной машины, предлагаемый фирмой ZF [11] и применяемый троллейбустроительными компаниями Skoda/Irisbus [5], Solaris [4], «Белкоммунмаш» [8], Van Hool [12] и др., показан на рис. 3.

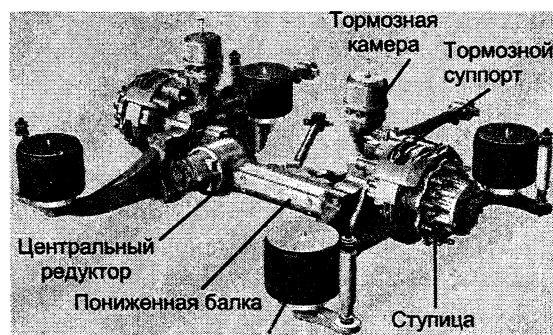


Рис. 3. Ведущий мост AV 132 фирмы ZF для низкопольного пассажирского транспорта

Максимально высвободить межколесное пространство для размещения низкопольного, в том числе по всей длине, кузова, улучшить тягово-сцепные качества особенно сочлененных машин, а также повысить коммуникативные качества привода и снизить удельный объем его механической передачи можно, применяя схемы с мотор-колесным приводом. Подобные конструкции приводов, применяемые в троллейбусах Irisbus IVECO Cristalis ETB [7], APTS Phileas [10], Writght Street Car [6] и др., предлагают фирмы ZF [11] (рис. 4), Alstom [7], Siemens [13], e-Traction [14]. Типоразмерные ряды таких приводов содержат варианты с различными значениями номинальной мощности двигателей до 120 кВт, номинальной частоты вращения, комплектуемые ступицами колес как для одинарных, так и для сдвоенных шин, содержащие дисковые тормоза и планетарные механизмы колесных редукторов.

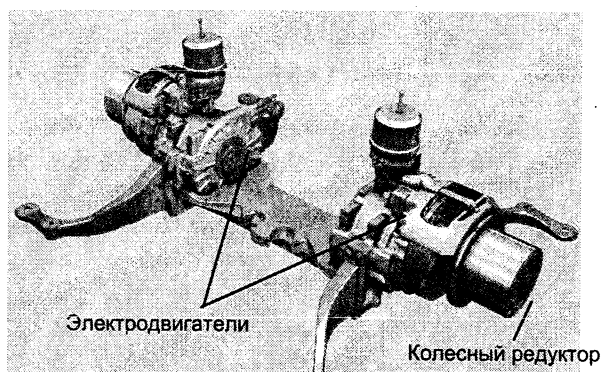


Рис. 4. Ведущий мост AVE 130 фирмы ZF с электромотор-колесным приводом для низкопольного пассажирского транспорта

В качестве автономных источников энергии (АИЭ) в современном троллейбустроении используются тяговые аккумуляторные батареи, дизель-генераторные установки и конденсаторные накопители. Наличие АИЭ и варианты их сочетания с питанием от контактной сети зависят прежде всего от требований по запасу автономного хода и по тягово-скоростным свойствам троллейбуса, а также, что особенно актуально, от возможности эффективно накапливать энергию при рекуперации для повышения экономичности троллейбуса. Так, для обеспечения запаса хода, сопоставимого с пробегом по маршруту, имеющему контактную сеть с относительно высокими тягово-скоростными свойствами машины, применяются, в частности на троллейбусах мод. 3300А «Белкоммунмаш» [8], Van Hool AG 300Т [12], дизель-генераторные установки, номинальная мощность которых приблизительно равна $2/3$ мощности тяговых электродвигателей. При эксплуатации троллейбуса на маршрутах, имеющих короткие промежутки (приблизительно до 10 км), например в исторической части города, не оборудованные контактной сетью, целесообразно применение дизель-генераторных установок, номинальная мощность которых составляет примерно $1/3$ – $1/2$ от номинальной мощности тяговых электродвигателей с потерей тягово-скоростных качеств. Подобные установки применяются на троллейбусах Skoda/Irisbus [5], Solaris Trollino [4], Irisbus IVECO [7], Neoplan [15], Van Hool A330Т [12], Hess [9].

Вариантом АИЭ с небольшой номинальной мощностью может являться установка с тяговыми аккумуляторными батареями (ТАБ), обеспечивающая невысокие характеристики тяговой динамики троллейбуса (максимальную скорость до 10 км/ч), дальность автономного хода до 1 км и, очевидно, требующая больших

трудозатрат в обслуживании в сравнении с остальными АИЭ. В качестве вспомогательного источника энергии ТАБ нашли применение на троллейбусах Skoda/Irisbus [5], Solaris Trollino [4], мод. 321 «Белкоммунмаш» [8], APTS Phileas [6, 10], New Flyer [6].

Перспективными для применения, в том числе и на троллейбусах в качестве АИЭ, являются конденсаторные установки. В сравнении с существующими ТАБ они, как заявляют некоторые разработчики [16], обладают рядом преимуществ: возможностью использования высоких зарядных и разрядных токов; увеличенным в четыре раза отношением времени работы ко времени зарядки; возможностью снижения до 10–20 с времени разрядки; высокими, до 6 кВт/кг, показателями удельной мощности; увеличенным в 10–15 раз количеством зарядно-разрядных циклов. Анализируя данные характеристики, можно предполагать разнообразие возможных вариантов применения конденсаторных установок на троллейбусе. Так, варьируя временем и токами разрядки можно в широком диапазоне изменять показатели тяговой динамики (ускорение, скорость движения), протяженность пути на автономном ходу от 1 до 10 км. Кроме того, имеется очевидная возможность эффективно накапливать энергию за счет рекуперации при торможении, тем самым повышать экономичность машины. Подобная установка, выполненная на базе конденсаторных батарей РКК «Энергия», используется на троллейбусе модели 42003А «Белкоммунмаш» [8].

В целом следует отметить, что применение ТАБ и конденсаторных установок в сочетании с контактной сетью, т. е. так называемого гибридного привода, наиболее эффективно, если с его помощью возможно накопление именно рекуперированной энергии. В противном случае за счет относительно низкой удельной энергии этих АИЭ (10–50 Вт·ч/кг) их масса может неоправданно снижать пассажировместимость троллейбуса, а соответственно и его производительность без повышения экономичности.

ВЫВОД

Таким образом, анализ требований, предъявляемых к троллейбусам нормативно-техническими документами, особенностей и тенденций в мировом троллейбустроении позволил систематизировать и ранжировать основные критерии формирования общей структуры тягового привода и представить их в виде сводной схемы, изображенной на рис. 5.

Ее использование на этапе проектирования и (или) модернизации машины позволит, исходя из требований заказчика к троллейбусу в целом, быстро и эффективно определиться со схемой привода, составом и конструкцией его

узлов, а соответственно с объемом и содержанием работ по проектированию и производству не только самого привода, но и автоматизированной системы по его управлению.

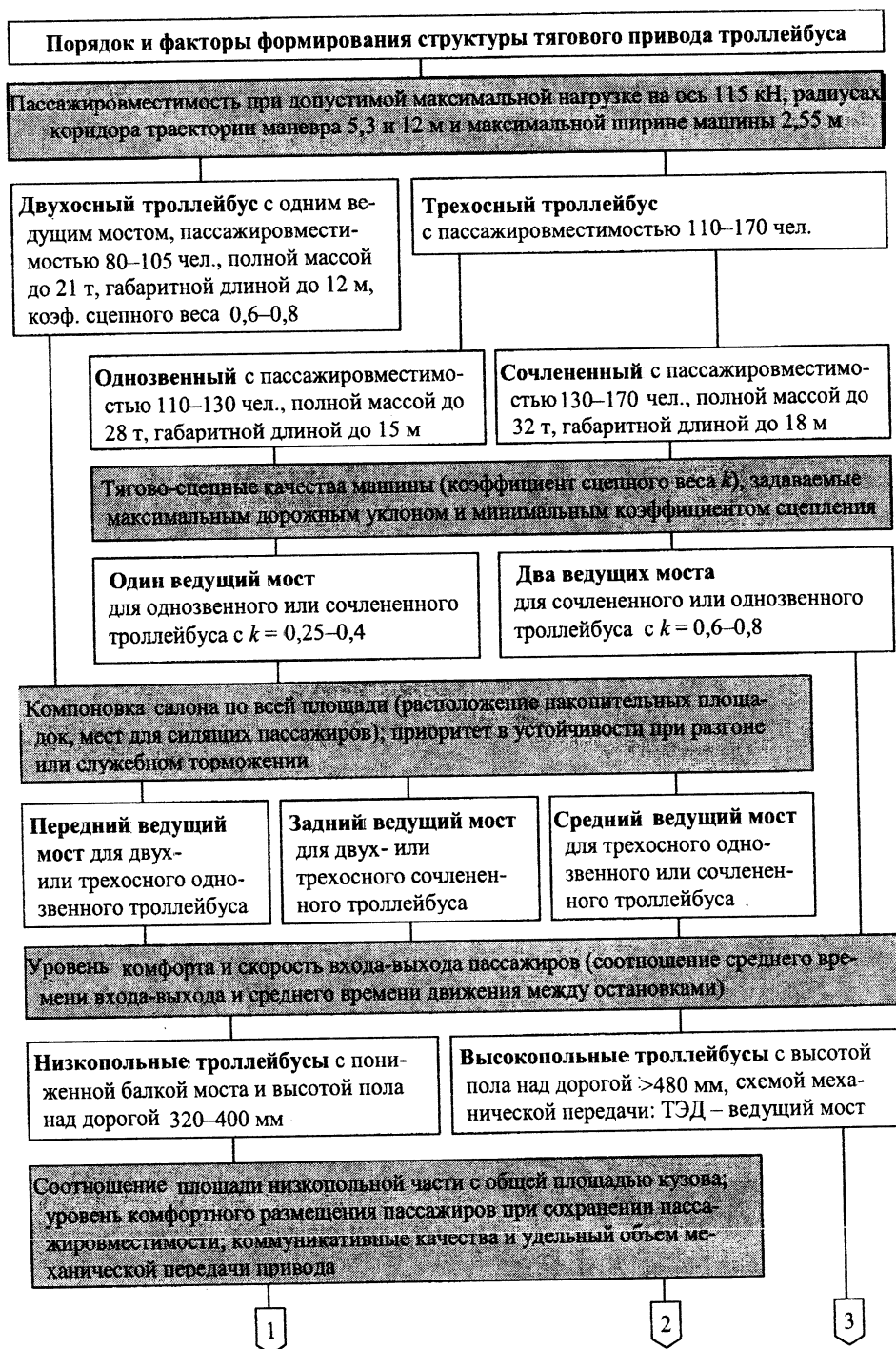


Рис. 5. Алгоритм формирования общей структуры тягового привода троллейбуса:
 [шaded box] фактор; [white box] конструкция (окончание см. на с. 56)

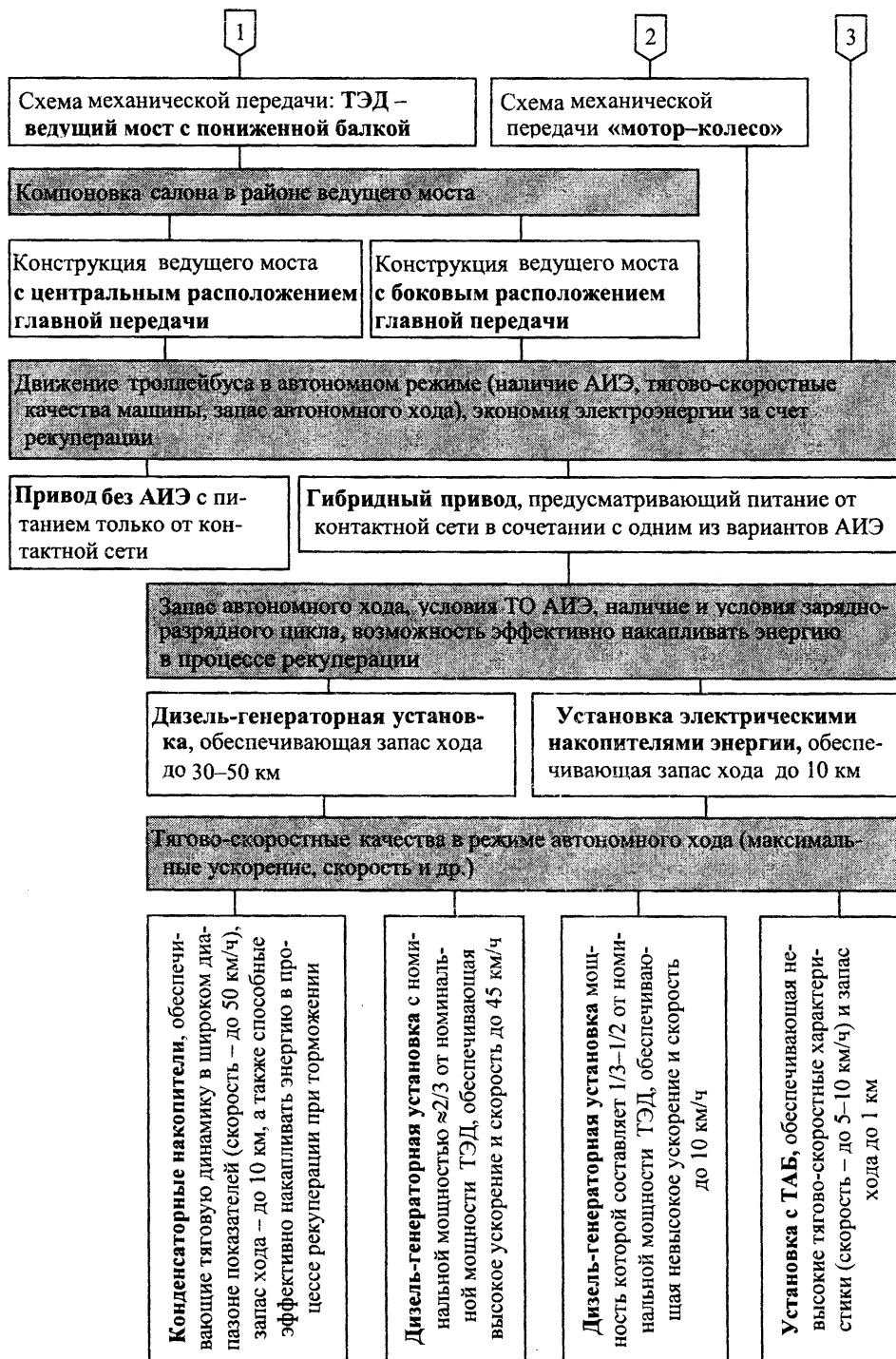


Рис. 5. Окончание (начало см. на с. 55)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Транспорт** дорожный. Массы, нагрузки на оси и габариты: СТБ 1878–2008. – Введ. 01.12.08. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2008. – 14 с.

2. **Единообразные** предписания, касающиеся официального утверждения пассажирских транспортных средств большой вместимости в отношении общей конструкции: Правила ЕЭК ООН № 36 (03) / Пересмотр. 2. – Введ. 01.03.04. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2004. – 124 с.

3. **Транспорт** дорожный. Массы и размеры. Технические требования и методы испытаний: СТБ 1877–2008. – Введ. 01.12.2008. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2008. – 44 с.

4. **Trollino**: Characteristic // Solaris Bus & Coach S. A. [Electronic resource]. – 2009. – Mode of access: <http://www.solarisbus.pl/en/trollino.html> – Date of access: 20.05.2009.

5. **ŠKODA 25 Tr IRISBUS** // SKODA HOLDING a. s. [Electronic resource]. – 2009. – Mode of access: <http://www.skoda.cz/en/skoda-holding/products/products-transportation/trolleybuses/skoda-25-tr-irisbus-aid749.html> – Date of access: 20.05.2009.

6. **Ashley, B.** Currently available articulated Trolleybuses / B. Ashley // The Electric Tbus Group [Electronic resource]. – 2008. – Mode of access: <http://www.tbush.org.uk/models.htm> – Date of access: 25.05.2009.

7. **Grand, P.** Irisbus Iveco: product management / P. Grand // UITP Trolleybuses Salzburg [Electronic resource]. – 2006. – Mode of access: http://www.tbush.org.uk/Grand_Irisbus2.pdf – Date of access: 20.05.2009.

8. **Продукция**: Троллейбусы // БЕЛКОММУНАШ [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: http://bkm.by/?id_page=8&id_category=1&path=8_1 – Дата доступа: 20.05.2009.

9. **Gisler, H.** HESS Swisstrolley3 / H. Gisler // BFE Forschungskonferenz Verkehr/Akkumulatoren / Paul Scherrer Institut (PSI) [Electronic resource]. – Villigen, 2005. – Mode of access: [http://www.tbush.org.uk/NL_2005_21_34_Swisstrolley\[1\].pdf](http://www.tbush.org.uk/NL_2005_21_34_Swisstrolley[1].pdf) – Date of access: 25.05.2009.

10. **PHILEAS** a tram on tyres // VDL [Electronic resource]. – 2009. – Mode of access: <http://www.apts-philas.com>. – Date of access: 25.05.2009.

11. **The latest** ZF news from around the world // ZF Friedrichshafen AG [Electronic resource]. – 2008. – Mode of access: <http://www.zf.com/corporate/en/press/press.html> – Date of access: 12.05.2009.

12. **Welcome** to the world of Van Hool: coaches and public transport // Van Hool NV [Electronic resource]. – 2009. – Mode of access: <http://www.vanhool.be/Home%20EN/coaches%20%26%20buses/Resources/refboek%20CAR%20BUS%20ENG.pdf> – Date of access: 21.05.2009.

13. **Mechanical** Integration // Siemens AG [Electronic resource]. – 2009. – Mode of access: http://www.automation.siemens.com/ld/bahnen/html_76/elfa/elfa-12.html – Date of access: 25.05.2009.

14. **Extremely** low floor applications now simplified: with the e-Traction® direct drive system combined with the specially designed universal axle // e-Traction Worldwide S. C. A. [Electronic resource]. – 2009. – Mode of access: http://www.e-traction.com/e-traction_universal_rear_axle.htm – Date of access: 25.05.2009.

15. **Троллейбус** марки Neoplan // Грузовики и Автобусы [Электронный ресурс]. – 2005. – № 3, AP №7 (332). – Режим доступа: http://trucks.autoreview.ru/new_site/trucks/archives/2005/n03/troll/1.htm – Дата доступа: 20.05.2009.

16. **Варакин, И. Н.** Электрохимические конденсаторы для гибридного электрического транспорта / И. Н. Варакин, А. Д. Клементов, Н. Ф. Стародубцев // ЗАО «ЭСМА» [Электронный ресурс]. – 1999. – Режим доступа: http://esmacap.com/FAQ/condensatory_dlua_electrotransporta.pdf – Дата доступа: 12.05.2009.

Поступила 19.06.2009