

Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 1



Т. С. Титова,
д. т. н., профессор,
первый проректор — про-
ректор по научной работе
Петербургского государ-
ственного университета
путей сообщения Импера-
тора Александра I (ПУПС)



А. М. Евстафьев,
к. т. н., доцент,
зав. кафедрой «Электриче-
ская тяга» ПУПС



М. Ю. Изварин,
к. т. н., доцент кафедры
«Электрическая тяга»
ПУПС



А. Н. Сычугов,
ст. преподаватель
кафедры «Электрическая
тяга» ПУПС

Рост цен на энергоресурсы вынуждает мировых производителей тягового подвижного состава вести непрерывный поиск технических решений для оптимизации эксплуатационных затрат. В статье приведен обзор современных гибридных транспортных средств (ТС), представленных ведущими компаниями на выставке InnoTrans в последние годы.

Название «гибридные» (лат. Hybrid — смесь) получили ТС, имеющие различные силовые установки либо получающие энергию от различных источников. К гибридам относятся тепловозы и дизель-поезда с накопителями энергии на основе электрических или гидропневматических аккумуляторов энергии, контактно-аккумуляторные электровозы, локомотивы, способные использовать различные виды топлива. С определенной долей условности гибридным можно считать многосистемный электроподвижной состав (ЭПС), дизель-электровозы и дизель-поезда. Основной прорыв в этом направлении наблюдается в области накопителей энергии. Подвижной состав такого типа использовался и ранее, использование гибридной конструкции было скорее вынужденным, продиктованным условиями

эксплуатации (например, для шахт, промышленности, метро и др).

Технический прогресс в области накопителей позволил существенно улучшить значения их массовых и габаритных показателей. В результате на одном ТС стало возможным использовать несколько разнотипных энергоресурсов.

Гибридные ТС рассматривают как переходный этап к новым силовым установкам. Однако пока трудно сказать, что представляют собой гибриды третьего поколения (тяговый подвижной состав с аккумуляторами): вид ТС либо ступень постепенного перехода к аккумуляторному подвижному составу.

В 2010 г. агентство по исследованию рынка Pike Research представило работу «Технологические инновации и драйверы роста спроса на тепловозы, электровозы, двух- и много-дизельные локомотивы и гибридные локомотивы. Анализ рынка и прогнозная оценка» [1].

Сегодня можно сказать, что прогноз роста едва ли выполнен: в начале 2018 г. в мире насчитывалось около 350 гибридных локомотивов, включая контактно-аккумуляторные¹ электровозы, причем часть из них вышла из строя и отставлена от эксплуатации. Но в сентябре 2018 г. почти все крупнейшие производители локомотивов представили предсерийные или серийные образцы на выставке InnoTrans-2018. Таким образом, в ближайшее время ситуация должна в корне измениться [2].

Гибридные технологии компании Toshiba

На выставке InnoTrans-2018 наиболее представительной была экспозиция ком-

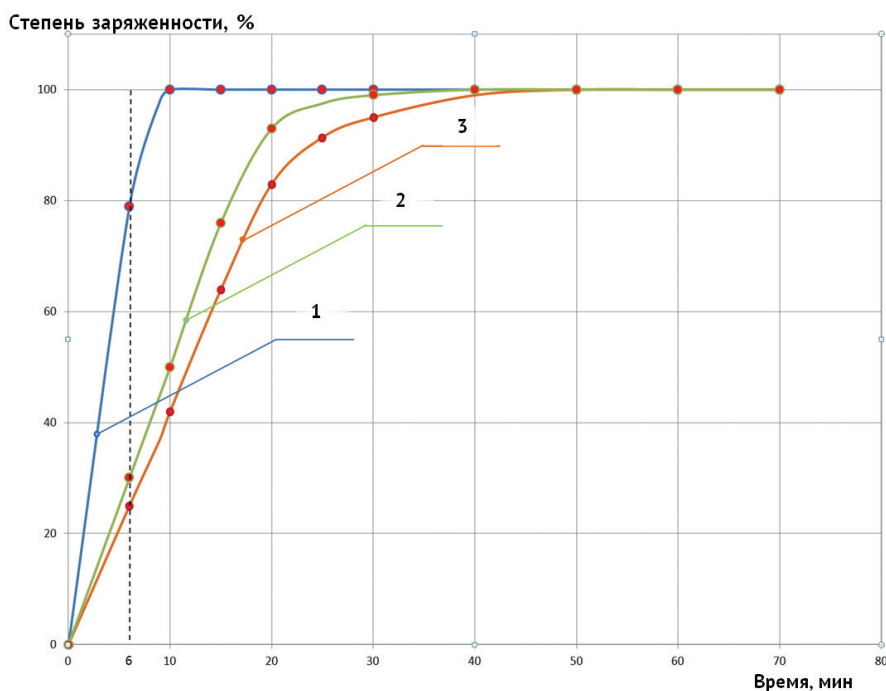


Рис. 1. Кривые ускоренного заряда тяговых литий-ионных батарей:
1 — литий-титанатная SCiBTM; 2 — литий-железофосфатная Winston battery;
3 — литий-ионная с катодом на основе лития и марганца

¹ Определение «гибридный» компании Pike Research отличается от принятого в России. В понятие «гибридные» не входят двухсистемные и многосистемные электровозы и дизель-электропоезда.

пании Toshiba (Япония), выпускающей как аккумуляторы для гибридного привода, так и подвижной состав (редкость в мировой практике). Бренд компании — литий-титанатные (литий-титаново-оксидные) аккумуляторные батареи SCiBTM (табл. 1), которые применяются на гибридных локомотивах и электропоездах. В России такие батареи пока называют литий-титановыми или нанобатареями, хотя это одна из разновидностей литий-ионных батарей. Аббревиатура SCiB расшифровывается как Super Charge Ion Batter, или дословно (литий-) ионная батарея, допускающая сверхбыстрый заряд. Литий-титанатные батареи существенно уступают традиционному литий-ионному и даже литий-железофосфатным по плотности энергии на единицу массы (у лучших образцов до 50 Вт·ч/кг) и лишь немного «опережают» по значениям этого показателя кислотные. Однако по другим критериям новые аккумуляторы значительно превосходят традиционные: возможность ускоренного шестиминутного заряда с гигантским (по меркам традиционных батарей) током 10С², более 10 000 циклов заряда-разряда, срок службы более 10 лет, способность работать при температуре до -30 °С.

За шесть минут при заряде током 8С (т. е. величину емкости, А·ч, необходимо умножить на 8), что для аккумулятора 20 Ач составит 160 А, за шесть минут батарея заряжается на 80 %, а за 10 мин — на 100 % (рис. 1) при схеме заряда постоянный ток — постоянное напряжение.

Из приведенных данных (рис. 1) следует, что по скорости заряда и величине зарядного тока (8С) литий-титанатная батарея существенно выигрывает у тяговых литий-ионных батарей других типов: литий-железофосфатной (3С) и литиево-марганцевой (1,5С).

Ранее компания Toshiba была представлена бортовая система накопителей электроэнергии для моторвагонного подвижного состава. В случае использования на электропоездах система позволяет накапливать энергию торможения вплоть до полной остановки³ и отдавать ее тяговым двигателям при пуске. Одна из основных сфер предполагаемого использования — дизельный гибридный моторвагонный подвижной состав. Накопитель SCiBTM, дизель-генератор и инверторы для питания ТЭД соединены через звено постоянного тока. В процессе движения

Таблица 1. Характеристики литий-титанатных аккумуляторов

| № | Характеристика | Значение |
|---|--------------------------------|--------------------------|
| 1 | Геометрические размеры, мм | 1900x2300x545 |
| 2 | Масса, кг | 1850 (примерно) |
| 3 | Запас энергии, кВт·ч | 60 |
| 4 | Тип охлаждения | Принудительное |
| 5 | Количество циклов заряд-разряд | До 20000 |
| 6 | Тип элемента (аккумулятора) | SCiB™, 20 А·ч |
| 7 | Место установки | На крыше или под вагоном |

Таблица 2. Основные технические характеристики гибридного локомотива компании Toshiba HD 300

| № | Характеристика | Величина |
|---|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | Осевая формула | $B_0 B_0$ |
| 2 | Энергия батареи, кВт·ч | 40 |
| 3 | Конструкционная скорость, км/ч | 45 |
| 4 | Тип тяговых двигателей | Синхронные, с постоянными магнитами |
| 5 | Мощность, кВт | 500 |
| 6 | Тип гибридной схемы | Последовательная |



Рис. 2. Маневровые гибридные локомотивы компании Toshiba: а – HD 300; б – DB CARGO HELMS

батарея заряжается от дизель-генераторной установки. При торможении энергия, выработанная тяговыми двигателями, которые работают в режиме генераторов, используется для заряда батареи и питания вспомогательного оборудования. При пуске энергия поступает от батареи на тяговые двигатели и на вспомогательное оборудование через преобразователь (инвертор).

Если в 2014 г. была представлена только батарея SCiBTM, то сегодня у компании имеется линейка собственного гибридного подвижного состава с такими источниками.

Основные направления развития гибридного привода следующие:

- гибридный дизель-электропоезд или дизель-поезд с параллельно-последовательной схемой, позволяющей повысить мощность при пуске и разгоне за счет батареи (Traction Assistance), и возможностью принятия энергии рекуперации на спусках или при замедлениях (Deceleration Regeneration);
- гибридные тепловозы с выполнением аналогичных функций;
- контактно-аккумуляторные электропоезда и дизель-электропоезда;

- система аварийного (бортового) питания тяговых двигателей для вывода поездов из тоннелей, с мостов до ближайшей станции, например в метрополитенах.

Кроме того, разработаны напольные системы для хранения тяговой энергии (Traction Energy Storage System, TESS) с принятием избыточной энергии рекуперации из контактной сети и стабилизацией напряжения в ней при большой нагрузке, а также для обеспечения аварийного питания при нарушении внешнего энергоснабжения. В некоторых случаях (Tobu Railway — Omiya koen Battery Post) система позволяет отказаться от дополнительных тяговых подстанций [3].

Гибридные маневровые локомотивы HD 300 и DB CARGO HELMS

Локомотивы HD 300 (рис. 2; табл. 2) эксплуатируются на железных дорогах Японии, а DB CARGO HELMS находятся в стадии проектирования по заказу компании DB Cargo. Первый из них — гибридный тепловоз с электропередачей, второй — модернизированный тепловоз, оборудованный механической переда-

² Под С понимается емкость аккумулятора (А·ч).

³ Зависит от системы управления конкретного ЭПС.

Таблица 3. Основные технические характеристики локомотива PRIMA H4

| № | Характеристика | Величина |
|---|---|-------------------------------------|
| 1 | Осевая формула | $B_0 B_0$ |
| 2 | Служебная масса, т | 80–90 в зависимости от конфигурации |
| 3 | Конструкционная скорость, км/ч | 120 |
| 4 | Тяговое усилие при трогании с места, кН | 300 |
| 5 | Мощность, кВт | до 2000 |
| 6 | Работа в сплотке по СМЕ, ед. | до 4 |

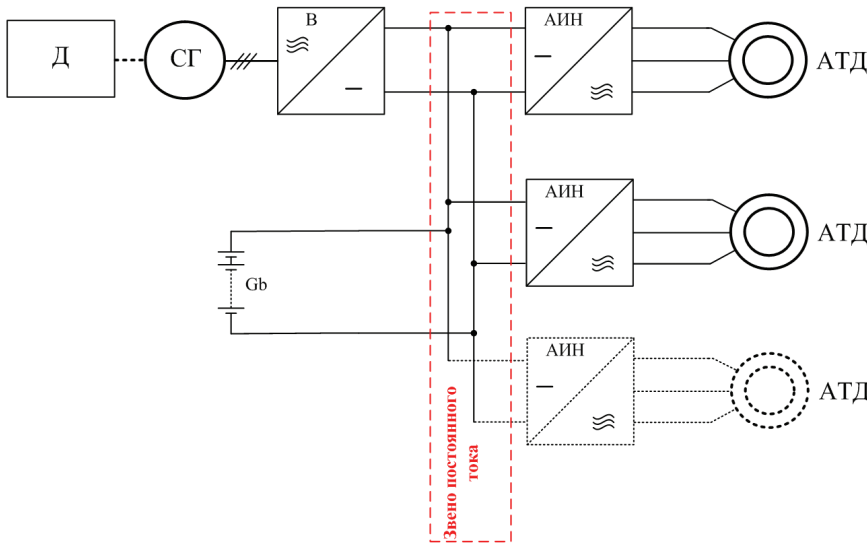


Рис. 3. Схема гибридного электропривода Toshiba: Д – дизель; СГ – генератор; В – выпрямитель; АИН – автономный инвертор напряжения; АТД – асинхронный тяговый электродвигатель

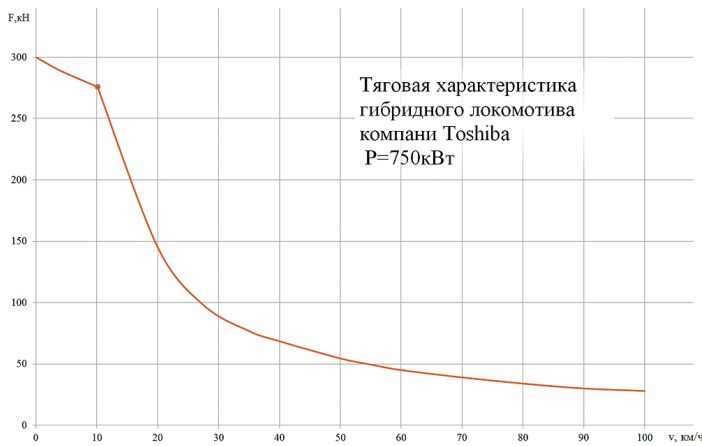


Рис. 4. Тяговая характеристика гибридного локомотива компании Toshiba

Таблица 4. Технические характеристики локомотивов DE 60C Hybrid и DE 75BB

| № | Характеристика | DE 60C Hybrid | DE 75BB |
|---|---|---|---|
| 1 | Осевая формула | C_0 | $B_0 B_0$ |
| 2 | Служебная масса, т | $67 \pm 3 \%$ | $80 \pm 3 \%$ |
| 3 | Конструкционная скорость, км/ч | 60 | 100 |
| 4 | Тяговое усилие при трогании с места, кН | 200 | 260 |
| 5 | Силовая установка | Дизель-генератор Caterpillar C 13 и литий-ионная аккумуляторная батарея | Два дизель-генератора либо дизель-генератор и литий-ионная аккумуляторная батарея. Дополнительно питание от третьего рельса 750 В или контактной сети |
| 5 | Мощность, кВт | от дизель-генератора: 354; от батареи: 350; на ободе колеса: 435 | от дизель-генератора: 354 либо 2×354 ; на ободе колеса: 600 |

чей. Согласно принятой классификации гибридные схемы локомотивов относятся к четвертому роду (дизельные локомотивы с накопителем энергии иного рода по сравнению с основным двигателем). В основе привода локомотива DB CARGO HELMS лежит последовательно-параллельная гибридная схема, в которой устройством, согласующим передачу мощности от дизельной установки к генератору, колесным парам и к аккумуляторной батарее SCiB, служит планетарный редуктор. Рассматриваемые локомотивы получены в результате переоборудования типовых немецких тепловозов BR 294 (V90). Конструкция последних включала увеличивающий сцепную массу балласт, поэтому удалось разместить аккумуляторную батарею и гибридный привод без увеличения массы и осевой нагрузки. В ходе модернизации гидропередача заменяется механическим проводом с планетарными редукторами, блоком батарей, тяговыми двигателями и генератором. Блок батарей аналогичен установленному на выпускавшемся ранее гибридном тепловозе японских железных дорог HD 300, однако имеет большую энергоемкость: до 150 кВт·ч.

Электрическая схема гибридного локомотива DB CARGO HELMS предусматривает установку накопителя в звено постоянного тока. Таким образом, гибридный привод может работать и как последовательный, и как параллельный (рис. 3).

Тяговая характеристика гибридного локомотива компании Toshiba приведена на рис. 4.

При трогании с места сила тяги составляет 300 кН. Переход на гиперболическую часть (расчетный режим) характеристики происходит при скорости около 10 км/ч, что считается нормальным для маневровой машины. Асинхронный привод обеспечивает постоянство мощности 750 кВт во всем диапазоне значений скорости. Таким образом, локомотив сможет выполнять маневровую работу с состава-



Рис. 5. Гибридный локомотив компании Alstom PRIMA H3

ми массой до тысячи тонн либо поездную работу с легкими поездами [4].

Гибридные локомотивы компании ALSTOM

В последние годы компания Alstom наладила выпуск серии гибридных локомотивов, прежде всего тепловозов с накопителями на основе аккумуляторных батарей. Компания выпускает серию гибридных локомотивов семейства PRIMA H3 (рис. 5) с различными техническими характеристиками и схемами, сейчас более 20 локомотивов находятся в эксплуатации.

В линейке имеется и чисто аккумуляторная машина (аккумуляторный электровоз), двухдизельный вариант и наиболее мощный дизель-аккумуляторный гибрид с дизелем до 1000 кВт. На локомотивах используется никель-кадмиевая аккумуляторная батарея. Локомотивы выпускаются в трехосном исполнении (осевая формула Ао-Ао-Ао).

Принципиальная электрическая схема гибридного локомотива PRIMA H3 приведена на рис. 6. Как и в рассмотренной гибридной схеме Toshiba, асинхронные тяговые двигатели питаются от индивидуальных инверторов, аккумуляторная батарея подключена параллельно в звено постоянного тока.

В схему гибридного локомотива входит зарядное устройство аккумуляторной батареи, что дает возможность работы без использования дизеля.

На выставке InnoTrans-2018 была представлена одна из последних разработок — более мощный четырехосный гибридный маневровый локомотив (дизель-электровоз) PRIMA H4 (рис. 7; табл. 3). По существующей классификации он относится к гибридам первого, третьего или четвертого рода, так как в зависимости от комплектации может быть снабжен (или нет) приводом с накопителем энергии. В первом случае это либо дизель-аккумуляторный локомотив, либо контактно-аккумуляторный электровоз. Большой выбор модификаций позволяет учитывать специфику эксплуатации на конкретных

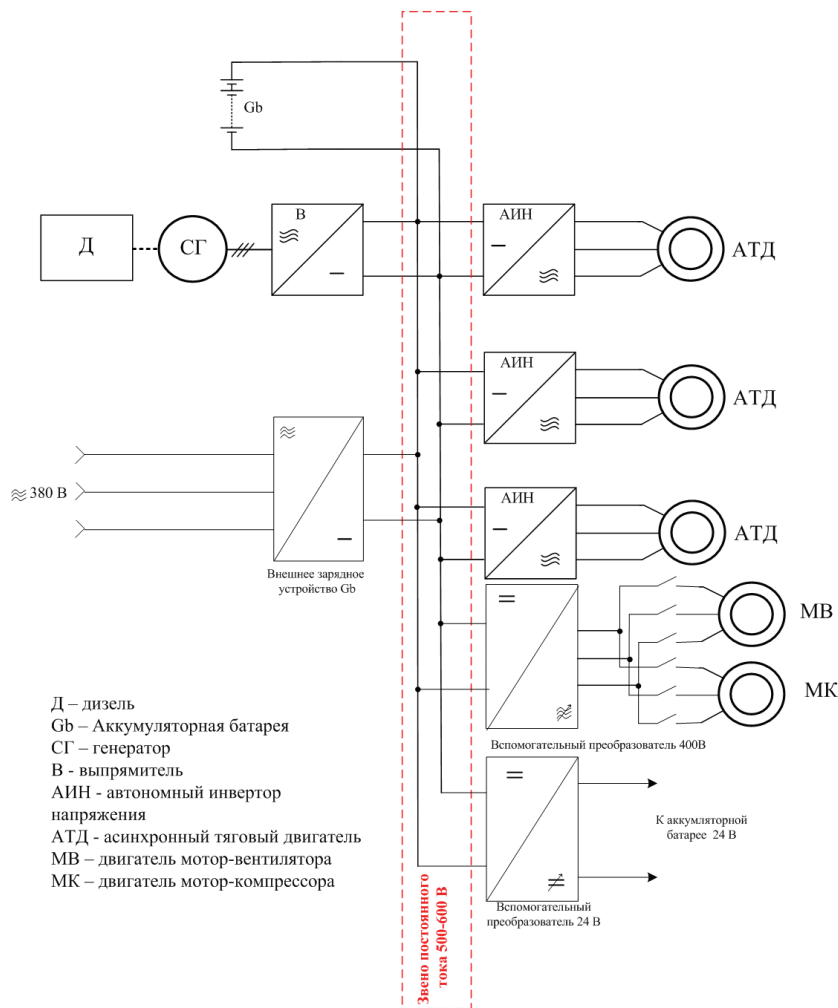


Рис. 6. Схема гибридного локомотива PRIMA H3



Рис. 7. Гибридный локомотив PRIMA H4

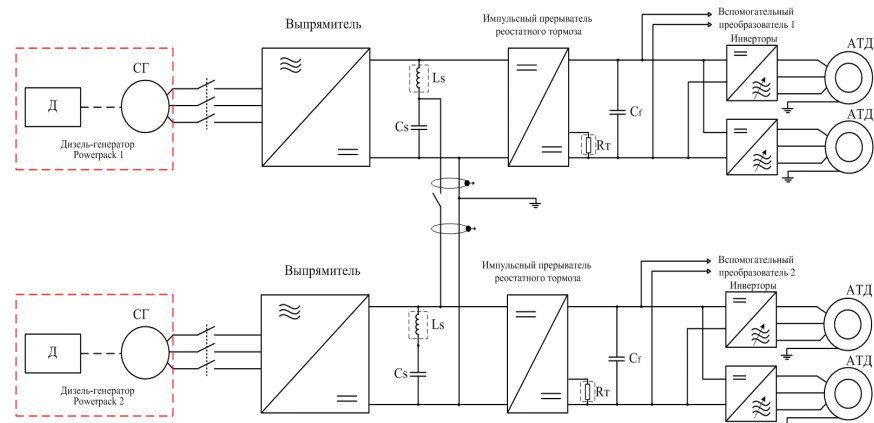


Рис. 8. Схема гибридного локомотива PRIMA H4 SBB Aem 940 в режиме питания от дизель-генератора

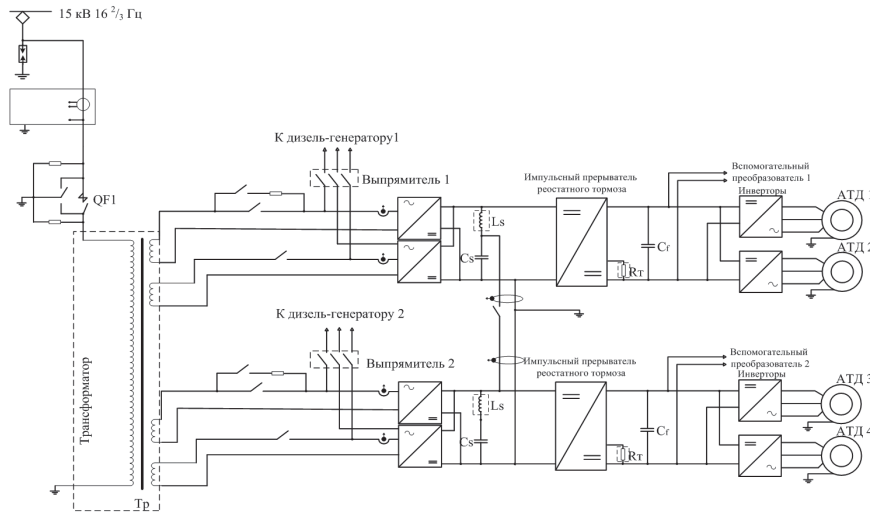


Рис. 9. Схема гибридного локомотива PRIMA H4 SBB Aem940 в режиме питания от контактной сети 15 кВ, 162/3 Гц

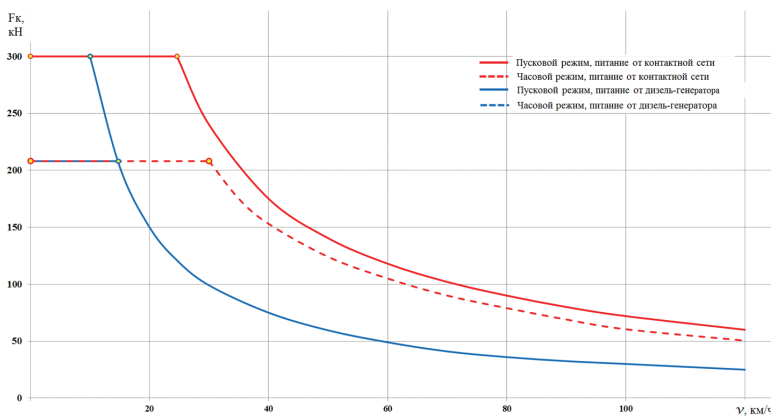


Рис. 10. Тяговые характеристики гибридного локомотива PRIMA H4 в режиме питания от дизель-генератора и контактной сети 15 кВ, 162/3 Гц

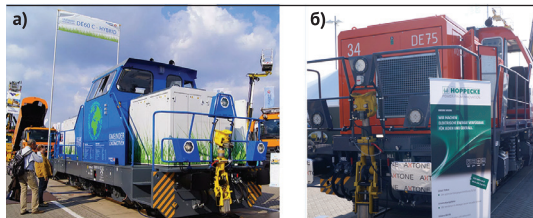


Рис. 11. Локомотивы DE 60C на выставке InnoTrans-2016 (а) и DE 75C на выставке InnoTrans-2018 (б)

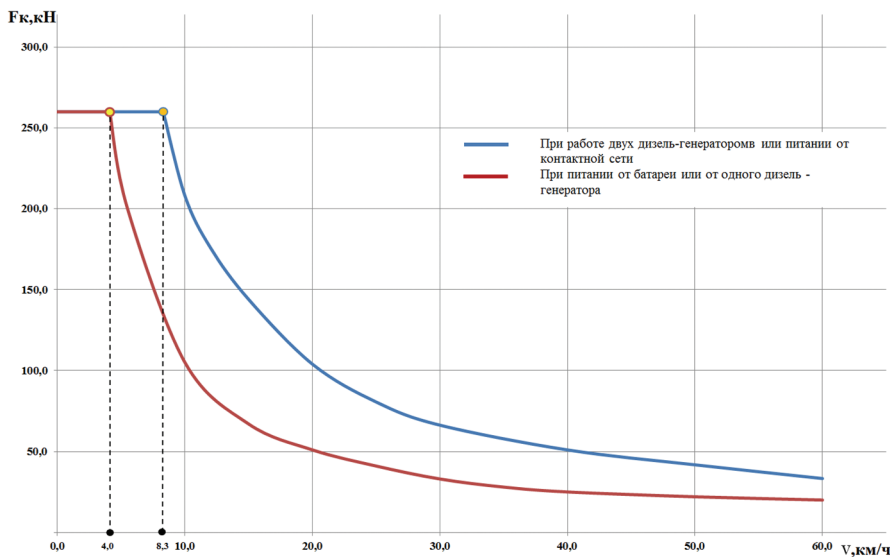


Рис. 12. Тяговая характеристика гибридного локомотива DE 75C

участках. На выставке был представлен маневровый дизель-электровоз с питанием от дизель-генераторной установки (рис. 8) либо от контактной сети 15 кВ, 162/3 Гц (рис. 9) [5].

Гибридные локомотивы DE 60 C Hybrid и DE 75 BB компании Gmeinder

Немецкая компания Gmeinder Lokomotiven GmbH, давно занимающаяся производством маневровых локомотивов, представила свои новые разработки в области гибридной техники. На выставке InnoTrans-2016 был представлен DE 60C Hybrid, а на InnoTrans-2018 — DE 75BB (рис. 11, 12).

Следует отметить, что локомотивы, как и в примере с Alstom, представляют собой многовариантные конструкции, созданные в соответствии с последними мировыми тенденциями: батарейный накопитель на основе литий-ионных батарей, силовая установка с двумя дизельными двигателями, возможность питания от третьего рельса с напряжением 750 В (только вариант DE 75BB). Модель DE 60C (результат модернизации DE 500C) представляет собой трехосный локомотив с индивидуальным приводом осей от тяговых электродвигателей, вариант DE 75BB — четырехосный. Технические характеристики локомотивов приведены в табл. 4 [6, 7].

Литература

- EXECUTIVE SUMMARY: Hybrid Locomotives Technology Innovations and Demand Drivers for Diesel and All-Electric Locomotives, Genset Locomotives, and Hybrid Locomotives: Market Analysis and Forecasts: отчет компании Pike Research. 2010. — 52 с.
- URL: <https://www.innotrans.de/en/>
- URL: <https://www.scib.jp/en/>
- URL: <https://railcolornews.com/2017/01/10/de-db-cargo-and-toshiba-study-development-of-new-hybrid-locomotives/>
- Max Wittwer. Alstom Platform H3 / H4 SBB Aem 940 Lokomotive. — URL: <https://docslide.net/documents/sbb-aem-940-lokomotive-tu-berlin-wittwer-projektleiter-09-mai-2016-sbb-aem-940.html>
- URL: <https://www.gmeinder-lokomotiven.de/willkommen/>
- Евстафьев А. М., Титова Т. С. Энерго-сберегающие технологии на тяговом подвижном составе. Монография. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. — 165 с.