

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ МАНЕВРОВЫХ ТЕПЛОВЗОВ С ЗАМЕНОЙ ГИДРО ПЕРЕДАЧИ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКУЮ ТРАНСМИССИЮ**

*С.Н. Флоренцев, Главный конструктор электропривода транспортных средств ООО «Русэлпром», Москва.*

В настоящее время на промышленных предприятиях РФ эксплуатируются более десяти тысяч промышленных маневровых тепловозов, в основном с гидромеханической передачей серий ТГМ-4 и ТГМ-6. Более 90 % маневровых тепловозов на промышленных предприятиях и эксплуатируемых в РЖД превысили срок эксплуатации и в соответствии с регламентом Таможенного Союза должны быть заменены или модернизированы. Предприятия, производящие такие маневровые тепловозы, не имеют производственных возможностей по поставкам новых маневровых тепловозов в требуемых объемах.

Концерн «Русэлпром», проработал варианты модернизации эксплуатирующихся маневровых тепловозов с гидромеханической передачей, предложил на этапе их капитального ремонта, используя существующую раму, тележки:

- заменить силовую установку на двух дизельную с асинхронными мотор – генераторами (АМГ);
- заменить гидropердачу на электромеханическую переменного - переменного тока с асинхронным тяговым двигателем (ТАД);
- перевести на электропривод вспомогательные системы тепловоза, модернизировать кабину управления.

Применение электромеханической трансмиссии (ЭМТ) с частотно - регулируемым асинхронным электроприводом, по сравнению другими типами трансмиссий (гидромеханической, переменного-постоянного тока) позволит:

- улучшить технико-экономические показатели тепловоза: увеличить тягу (особенно в диапазоне малых скоростей), повысить КПД, снизить расход топлива на единицу выполненной работы, обеспечить бесступенчатое регулирование скорости маневрового тепловоза, увеличить производительность работы, снизить динамические нагрузки на узлы тепловоза и ДВС;

- снизить эксплуатационные затраты на техническое обслуживание, ремонт и расходные материалы, повысить надежность работы маневрового тепловоза в целом. Применение двух дизельной установки, учитывая цикл работы маневрового промышленного тепловоза, позволит большую часть времени работать одной ДГУ меньшей мощности, обеспечивая экономию топлива и увеличивая ресурс работы ДВС.

Применение асинхронных мотор – генераторов (АМГ) с двунаправленным преобразователем частоты (ПЧ) позволяет получать любой необходимый уровень напряжения на выходе ПЧ вне зависимости от частоты вращения ДВС. Это позволяет регулировать ДВС в режиме максимальной топливной эффективности (минимуме потребления топлива) во всем диапазоне мощностей и частот вращения ДВС. Кроме того, появляется возможность реализовать компрессионное торможение ДВС, преобразуя энергию торможения тепловоза вначале в электрическую, переводя ТАД в генераторный режим, рассеиваемую эту энергию затем в ДВС, переводя АМГ в двигательный режим.

Функциональная схема предлагаемой электромеханической трансмиссии, в виде комплекта тягового электрооборудования (КТЭО), приведена на рис. 1.

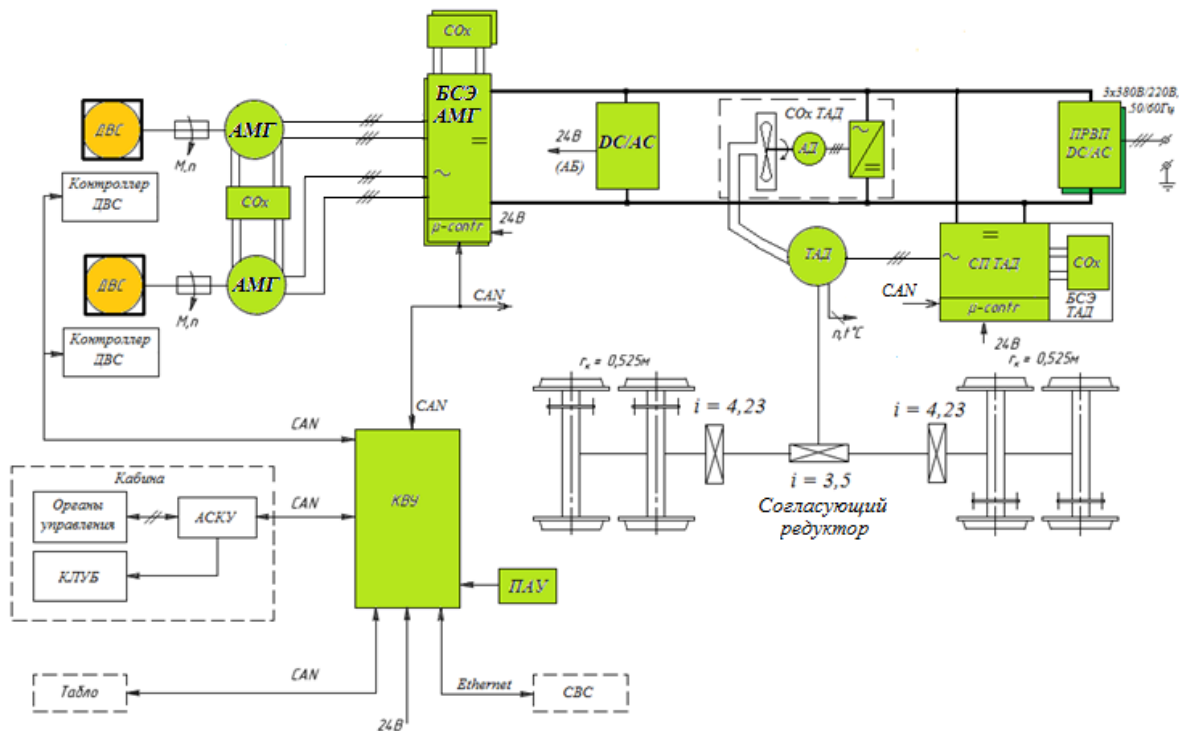


Рисунок 1. Функциональная схема КТЭО ЭМТ.

Комплект тягового электрооборудования (КТЭО) для модернизируемых маневровых тепловозов ТГМ-4 и ТГМ-6 содержит:

- два асинхронных мотор – генератора (АМГ), соединенных с двумя ДВС;
- силовые преобразователи для АМГ (СП АМГ);
- системы охлаждения АМГ и СП АМГ (СОх);
- тяговый асинхронный двигатель (ТАД) с согласующим редуктором;
- силовой преобразователь для ТАД (СП ТАД);
- система охлаждения ТАД (СОх ТАД);
- система охлаждения СП ТАД (СОх БСЭ ТАД);
- контроллер верхнего уровня (КВУ) для управления компонентами КТЭО, связанный с органами управления в кабине тепловоза;
- пульт аварийного управления (ПАУ);
- преобразователь DC/AC для питания асинхронного двигателя воздушного компрессора, кондиционера и др. вспомогательных систем тепловоза;
- преобразователь DC/DC для заряда аккумуляторной батареи и питания потребителей по цепи 24В.

В эту схему может быть добавлен буферный накопитель энергии, что позволит получить до 50% экономии топлива при маневровой работе тепловоза.

Подобная схема электромеханической трансмиссии, но с одним ДВС, реализована фирмой Toshiba (Рис. 2).

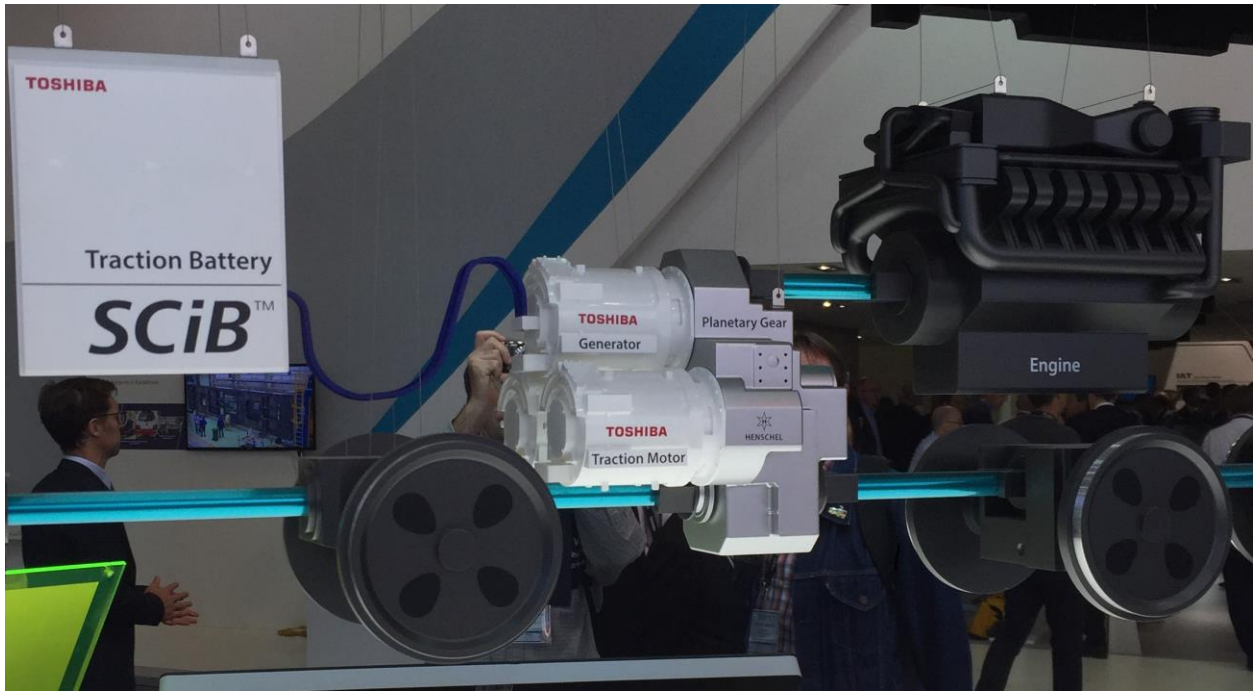


Рис. 2.

Для определения параметров всех компонентов КТЭО и ДВС были проведены тягово-динамические расчеты для реализации технических требований к маневровому тепловозу (на примере ТГМ-6):

Для обеспечения движения 90т тепловоза с максимальной скоростью 41 км/час на нулевом уклоне требуется 16 кВт тяговой мощности; со скоростью 9 км/час и силой тяги 232,4 кН на нулевом уклоне требуется тяговая мощность 581 кВт. При этом ТАД должен быть рассчитан на длительную мощность 683 кВт (581 / 0,851).

Оценивая КПД КТЭО (от вала ДВС до вала ТАД) равным 0,86 (0,95x0,98x0,98x0,95), для обеспечения такой тяги от ДВС потребуется свободная мощность 788 кВт. Такую мощность обеспечивают два дизеля (например, TAD1345VE) мощностью по 525 л.с. АМГ должны быть рассчитаны на входную механическую мощность 386 кВт, которую они должны реализовывать в диапазоне скоростей ДВС, с учетом характеристик последнего. Для примера, на рис. 3 приведены предельные (3.а) и поле частичных характеристик (3.б) ДВС TAD1345VE.

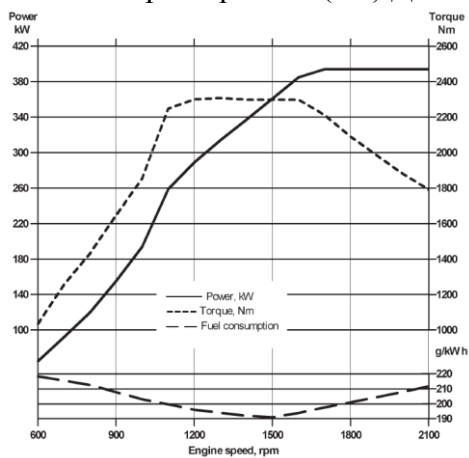


Рис. 3.а.

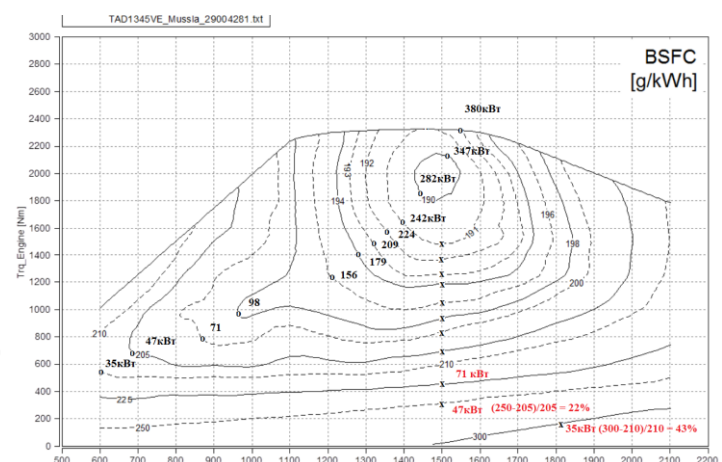


Рис. 3.б.

Из характеристик рис. 3.а следует, что АМГ должен обеспечить максимальную мощность при частоте вращения 1700 об/мин, а максимальный момент, который реализует АМГ не должен превышать 2325Нм при частоте вращения более 1200 об/мин.

Так как, частота вращения ДВС и его момент на его валу никак не связаны со скоростью тепловоза и его тягой, а АМГ с СП АМГ могут обеспечить любое напряжение на шине постоянного тока КТЭО появляется возможность реализовать оптимальное по топливной эффективности управление ДВС, отбирая от него необходимую на тягу и вспомогательные нужды мощность, которую он отдает на частоте вращения коленчатого вала ДВС при минимальном потреблении топлива (см. рис. 3.б). Учитывая, что большую часть времени (~ 80%) маневровый тепловоз работает на холостом ходу, перевод ДВС на частоту вращения 600 об/мин обеспечит экономию топлива около 40% (удельный расход топлива в этой точке составляет 210 г/кВт.ч) по сравнению с вариантом использования синхронного генератора, который и в этом режиме должен работать на частоте вращения 1500 об/мин (удельный расход топлива в этой точке составляет 300 г/кВт.ч).

Для обеспечения оптимальных характеристик: габариты, вес, КПД, токи в дополнение к существующим редукторам тележек предложено в результате перебора использовать дополнительный согласующий редуктор с коэффициентом редукции 3,5:1. При этом максимальная частота вращения ТАД на скорости 41 км/час составит и радиусе колеса 0,525м составит:

$$N_{max} = \frac{41 \cdot 1000 \cdot 3.5 \cdot 4.23}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 0.525} = 3067 \text{ об/мин}$$

Для обеспечения длительной силы тяги 232,4кН на новых бандажах ТАД должен обеспечить длительный момент:

$$M = \frac{232.4 \cdot 0.525}{0.851 \cdot 3.5 \cdot 4.23} = 9,684 \text{ кНм}$$

При мощности ТАД = 683кВт такой момент должен обеспечиваться до частоты вращения ТАД:

$$N = \frac{683 \cdot 9548}{9684} = 673 \text{ об/мин}$$

Для обеспечения силы трогания 352,8 кН ТАД должен обеспечить кратковременно момент 14,7 кНм до частоты вращения 444об/мин.

На основании перечисленных выше требуемых параметров АМГ и ТАД были спроектированы АМГ и ТАД, параметры которых приведены в таблице 1. Расчетные параметры ТАД приведены в таблице 2.

Для обеспечения этих параметров ТАД, с учетом жестких требований к тепловозу по стойкости к механическим и климатическим воздействиям была выбрана элементная база силовой электроники и спроектирован силовой преобразователь. В силовом преобразователе применен интеллектуальный IGBT-модуль семейства SKiiP X фирмы Semikron [1]. Это первый в мире на рынке силовой электроники прибор, предназначенный для работы в условиях климатического класса 3К4. Данные условия эксплуатации допускают возможность образования конденсата в рабочем режиме, т.е. модули SKiiP X могут работать в силовом преобразователе при уровне загрязнения PD3. Модуль имеет высочайшие показатели надежности из-за отсутствия паяных и сварных соединений, встроенной системы жидкостного охлаждения, герметичного корпуса, высокой стойкости к термоциклированию, интегрированного управления с сверхнизкой фазовой ошибкой, гарантирующей равномерное распределение токов, симметричную коммутацию базовых элементов, сохранение динамических характеристик в течение срока службы. Модуль состоит из базовых полумостовых элементов (blade) с собственными изолированными драйверами, изолированным датчиком температуры.

На рисунке 4. приведена блок-схема и внешний вид силового интеллектуального модуля SKiiP X, объединяющего в едином конструктиве до девяти базовых элементов.

Так, 3 - фазный шести элементный модуль SKiiP 121GD17E-6DW имеет  $I_{rms} = 1080A$ , а девяти элементный SKiiP 121GD17E-9DW – 1620A.

Таблица 1.

№ п/п	Наименование параметра	Величина
1	Мощность на входе каждого АМГ на тягу, кВт, длительная	350
2	Диапазон рабочих скоростей вращения вала АМГ, об/мин	600 - 2200
3	Номинальная скорость АМГ при мощности 350 кВт, об/мин	1700
4	Максимальный момент на валу АМГ, Н*м (при скорости 1500 об/мин)	1910
5	Напряжение на шине постоянного тока, В, не более	800
6	Максимальная мощность на валу ТАД, кВт, длительно (до скорости вращения 2400 об/мин)	683
7	Максимальный длительный момент на валу ТАД, кН*м (при $N_{тад} \leq 673$ об/мин – 9 км/час) на новых бандажах	9,684
8	Максимальный пусковой момент на валу ТАД, кН*м (кратковременно, трогание) на новых бандажах при $N_{тад} \leq 444$ об/мин	14,7
9	Коэффициент редукции согласующего редуктора ТАД - тележки	3,5 : 1
10	Максимальная скорость вращения ТАД, об/мин (при скорости тепловоза 41 км/час) на новых бандажах на изношенных бандажах	3067 3286
11	Суммарный КПД КТЭО, не менее	0,86

Таблица 2.

Наименование параметра	Значение параметра							
	2	5	9	13,3	15	20	30	41
Скорость, км/час	2	5	9	13,3	15	20	30	41
Мощность, кВт	139	343	617	617	617	617	617	617
Частота вращения, об/мин	150	374	673	994	1122	1496	2244	3067
Напряжение, В	73	180	324	477	535	535	535	<b>535</b>
Ток, А	1405	1300	1273	887	800	774	770	<b>796</b>
Частота, Гц	8	19.15	34.05	50	56.35	75.15	112.7	154.1
КПД, %	86.0	94.0	96.0	96.8	96.8	96.6	96.1	95.0
Коэффициент мощности	0.91	0.9	0.9	0.87	0.86	0.89	0.9	0.88
Момент, Нм	8880	8760	8760	5930	5250	3940	2630	1920

На рисунке 5 показан фрагмент силового преобразователя ТАД с установленной мощностью 1,5 МВт, выходным током 1620А, максимальным напряжением на шине постоянного тока 1250В на базе 9-ти элементного модуля SKiiP X: модуль SKiiP 121GD17E-9DW, три датчика выходного тока, ламинированная шина постоянного тока и пленочные конденсаторы. Габариты такой сборки составляют (Ш x В x Г) 650 x 350 x 550мм, объем – 125л.

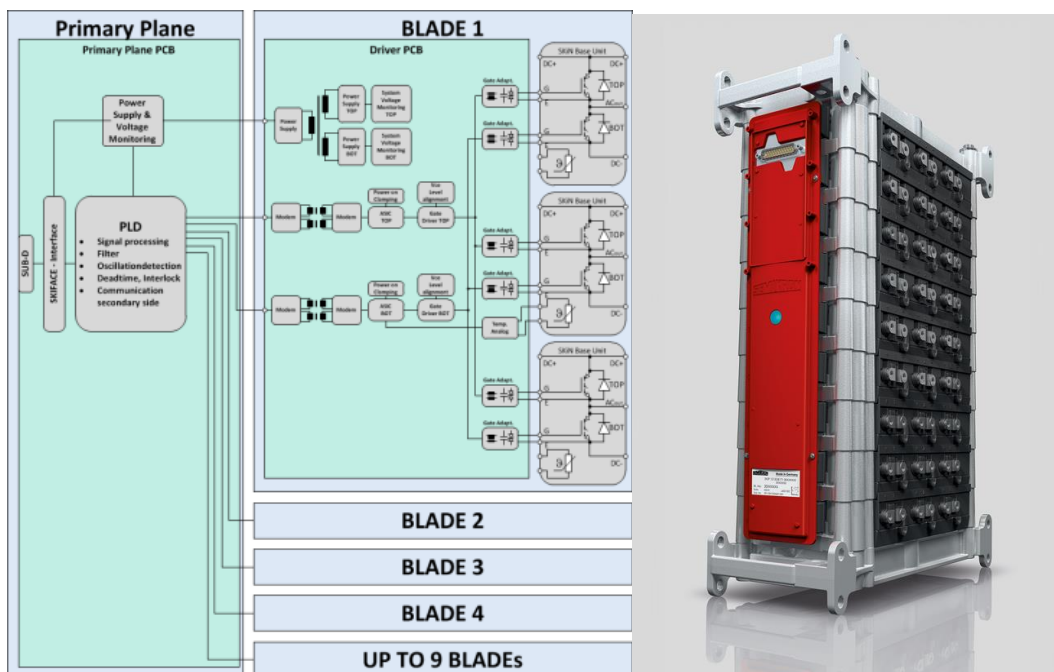


Рис. 4.

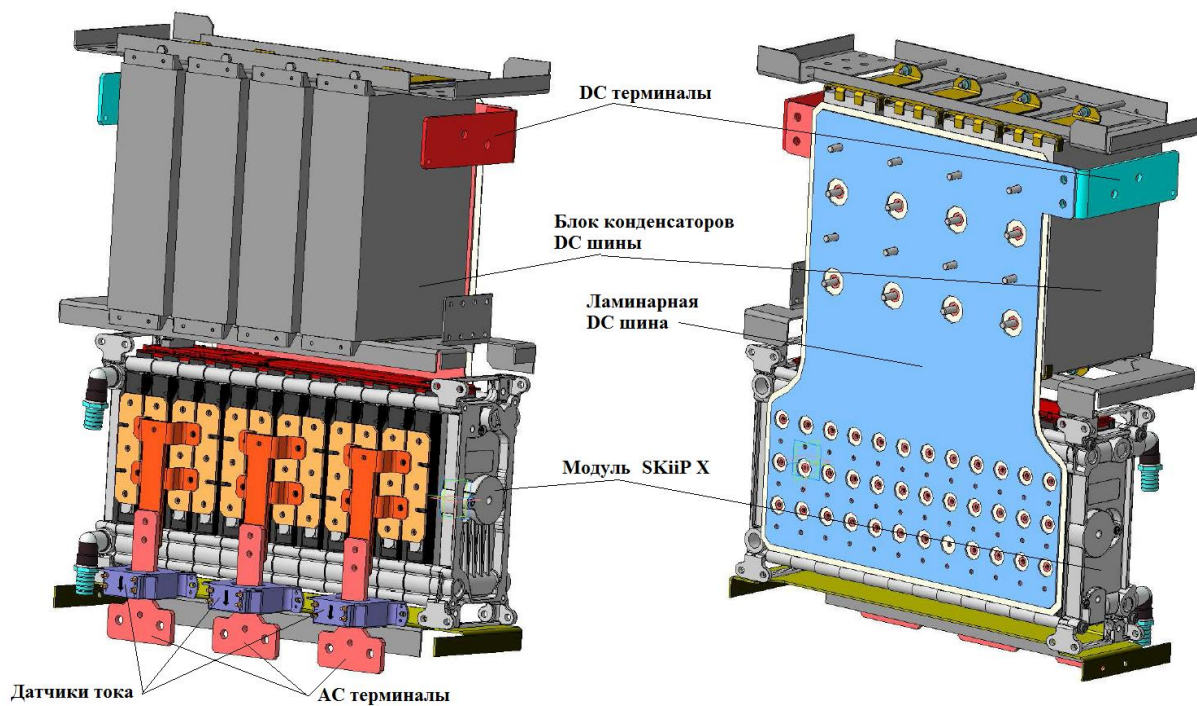


Рис. 5.

Асинхронные мотор – генераторы (АМГ) и блоки силовой электроники (БСЭ) для их управления использованы от проекта КТЭО МПТГ-2 [2].

В таблице 3 приведены расчетные параметры АМГ.

Таблица 3.

P	U <sub>f</sub>	f	M	N	I	h	cos $\phi$	R <sub>s20</sub>	X <sub>s</sub>	R <sub>r'</sub>	X <sub>r'</sub>	X <sub>m</sub>
кВт	В	Гц	Нм	об/мин	А	%	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
400	282	85,8	2247	1700	560	95,5	0,885	0,00482	0,0613	0,049	0,0529	1,7457
450	282	106,3	2947	2100	626	94,9	0,895	0,00482	0,0759	0,053	0,0655	2,6235

В БСЭ АМГ применены интеллектуальные интегральные силовые IGBT-модули SKAI-2 фирмы Semikron SKAI 45 A2 GD12-WDI. Модуль с интегральным жидкостным охлаждением имеет в своем составе трехфазный инверторный мост на IGBT-транзисторах и SFRD- быстровосстанавливающихся диодах, три датчика выходного тока, датчики температуры подложки силовых ключей и напряжения шины постоянного тока с пленочным восстанавливающимся конденсатором, интеллектуальный драйвер для управления ключами с защитами по току, напряжению, температуре. SKAI-2 обеспечивает работу с напряжением на шине постоянного тока до 800В, длительный выходной ток 300А (действующее значение), степень защиты IP67. При габаритах (Д x Ш x В) 475x244x109 мм имеет вес 13,9 кг.

В СП ТАД и БСЭ АМГ используется контроллер силовых преобразователей (КСП) на базе DSP микропроцессора TMS320F28335PGFA, в котором реализованы функции векторного управления двумя преобразователями SKAI-2, связь по CAN-шине с контроллером верхнего уровня (КВУ) КТЭО, диагностика и защиты, запись и передача информации в КВУ, включая и передачу аварийных логов.

КВУ осуществляет прием информации от органов управления в кабине машиниста и передачу обратно сигналов для отображения в кабине; реализует по CAN-шинам управление КСП в СП ТАД и БСЭ АМГ, управление ДВС по протоколу J1939.

Компоновка КТЭО на раме тепловоза показана на рисунке 6. Эта конструкция представляет из себя модуль с ЭМТ, который устанавливается на тележки тепловоза.

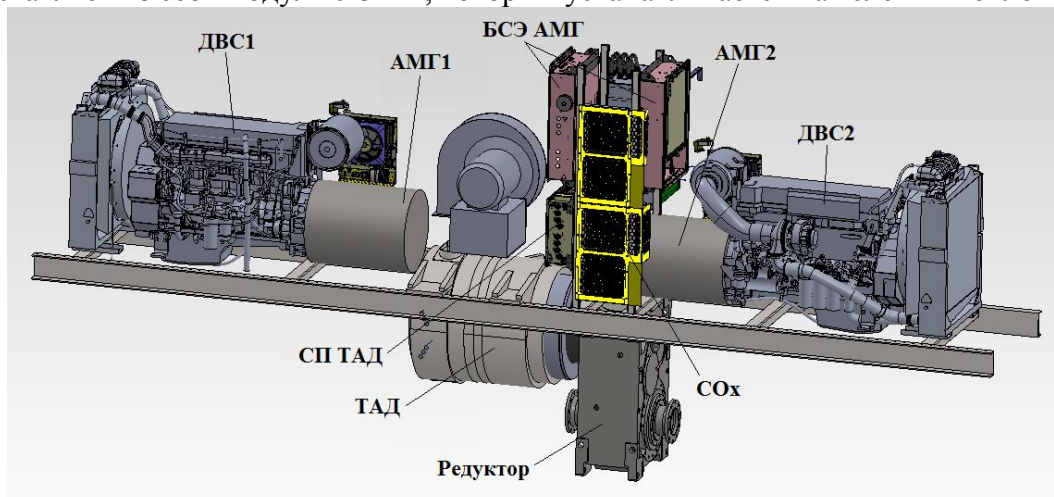


Рис. 6.

Таким образом, в результате применения электрического тягового оборудования и применения двух маломощных дизельных двигателей экономия топлива составит 36,6 тонн  $(16,07346 - 11,38932) \cdot 21,4 \cdot 365 / 1000$ , или более 1 281 000р. (при цене топлива в 35р.). При капитальном ремонте с учетом необходимости замены дизеля и гидropередачи, стоимостью порядка 15 млн. рублей, дополнительные затраты при установке КТЭО составят порядка 2-3 млн. рублей. Эти затраты окупятся в течение 3-5 лет, что делает проект экономически целесообразным и эффективным с учетом возможности продления срока службы модернизированного тепловоза на 10 лет.

#### Литература

1. Thomas Grasshoff, Reinhard Helldorfer. (Перевод и комментарии Андрей Колпаков). SKiiP X – силовой интеллектуальный модуль XXI в. // Силовая электроника. № 4, 2014. С. 20 - 23.

2. С.Н. Флоренцев, А.М. Титов, В.Н. Орлов, С.В. Байда, А.А. Белоусов. Комплект тягового электрооборудования для асинхронного привода мотовоза МПТГ-2 // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. АЭП-2016. Пермь, 3-7 октября 2016 г. С. 522 – 526.