

Универсальная тяговая электромеханическая трансмиссия дизель-электротранспорта с использованием сетевого питания на магистральных трассах

Станислав РЕЗНИКОВ,
д. т. н.
rezn@formatek.ru
Александр СОКОЛОВ

Статья призывает транспортных специалистов вернуться к отвергнутой ранее электромеханической трансмиссии на базе дифференциального редуктора, двух электромашин и статического преобразователя частоты. Данный подход представляется вновь целесообразным, особенно на новом витке развития силовой полупроводниковой электроники, и в том числе — в связи с предлагаемыми авторами нетрадиционными схемотехническими решениями в построении статических преобразователей.

На дизельнотранспортных средствах наиболее часто используется механическая трансмиссия на базе регулируемой коробки передач или гидромеханического привода, которые считаются наиболее уязвимыми по надежности звеньями. Одним из эффективных способов повышения экологичности указанного транспорта и снижения расходов на топливо является совмещение на борту дизельных двигателей, работающих на периферийных трассах, с тяговыми электродвигателями, получающими на магистральных трассах питание через скользящие токоприемники от сетевых железнодорожных, трамвайных или троллейбусных проводов.

На рис. 1 в качестве наиболее характерного примера такого совмещения приведена тяговая схема универсального дизель-электро-

воза с электромеханической трансмиссией на базе регулируемой коробки передач (РКП), двух электромашин постоянного тока ($M_{1,2}$) и силового реостатного контроллера с питанием от железнодорожной сети постоянного тока ($\pm 3^{+1}$ кВ). Схема способна помимо режимов дизельной или электромашинной тяги обеспечить режимы резистивного или резистивно-рекуперативного торможения. Основным ее недостатком в аспекте надежности является наличие ступенчато регулируемой коробки передач или плавно регулируемого гидромеханического привода. В последние годы вместо электромашин постоянного тока и силового реостатного контроллера используются асинхронные двигатели с тяговым статическим преобразователем. Более рациональными считаются приводы, в кото-

рых преобразованию подвергается только доля энергии силовой установки, а большая ее часть в номинальном режиме передается непосредственно на рабочий выходной вал. Для этой цели в состав привода входит дифференциальный редуктор, разделяющий или суммирующий частоты вращения при сохранении приведенного вращающего момента.

В дифференциальных гидромеханических системах, получивших широкое применение, особенно в авиации, рабочий выходной вал в основном приводится во вращение при помощи механической передачи, а гидравлическая передача (гидронасос-гидромотор) только поддерживает его скорость постоянной или регулирует ее. Применение такой системы по сравнению с чисто гидравлической передачей, преобразующей всю энергию, позволяет повысить общий КПД системы приблизительно на 17–18% [1].

Дальнейшее повышение КПД и сокращение эксплуатационных затрат на гидропривод могут быть достигнуты путем сочетания дифференциального редуктора с электромеханической передачей на базе двух электромашин (система генератор-двигатель) [2–5]. В случае создания универсальной тяговой электромеханической трансмиссии дизель-электротранспорта с возможным сетевым питанием на магистральных трассах такая структура представляется наиболее рациональной ввиду многофункционального использования обеих электромашин:

- 1) Для регулирования скорости рабочего выходного вала при дизельной тяге.
- 2) Для обеспечения тяги при питании от сети.
- 3) Для резистивного или рекуперативного торможения.

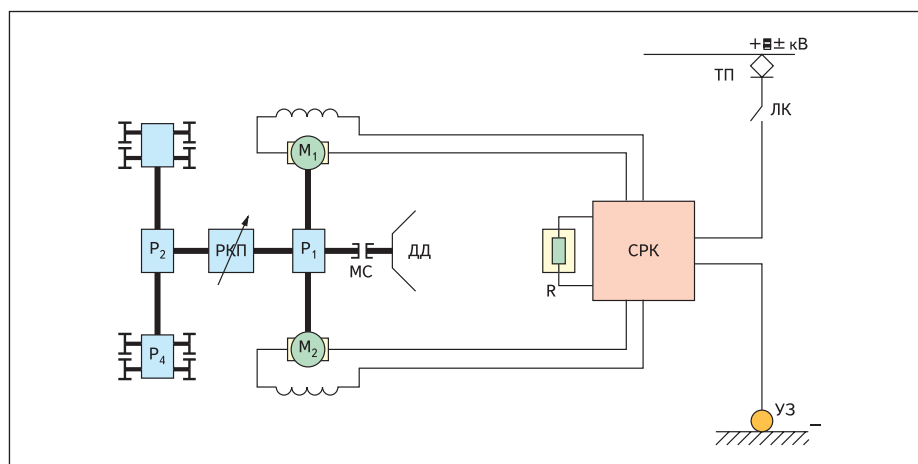


Рис. 1. Тяговая схема универсального дизель-электровоза с электромеханической трансмиссией на базе регулируемой коробки передач (РКП), электромашин постоянного тока ($M_{1,2}$) и силового реостатного контроллера (СРК)

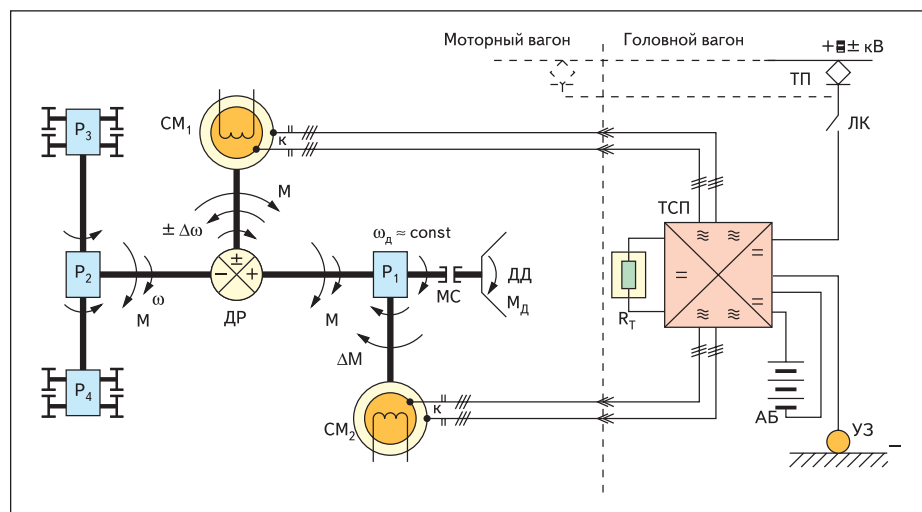


Рис. 2. Тяговая схема секции универсального дизель-электропоезда с электромеханической трансмиссией на базе дифференциального редуктора (ДР), двух синхронных машин (СМ_{1,2}) и тягового статического преобразователя (ТСП)

4) Для электрозапуска двигателя от аккумуляторной батареи.

На рис. 2 приведена альтернативная тяговая схема секции универсального дизель-электропоезда с электромеханической трансмиссией на базе дифференциального редуктора (ДР), совмещающая принцип, изложенный в [1–3], со схемой питания синхронных машин (СМ_{1,2}) от высоковольтной сети через тяговый статический преобразователь (ТСП).

Схема работает следующим образом. Для простоты изложения примем условия: для первого редуктора (Р1): $\omega_D = \omega_{\text{вх.ДР}} = \omega_{\text{СМ}_2}$ и $M_D + \Delta M = M_{\text{вх.ДР}} = M$, а для дифференциального редуктора (ДР): $\omega_D = \omega + \Delta\omega$ и $M_{\text{вх.}} = M_{\text{вх.}} = M_{\text{СМ}_1} = M$. Запуск дизельного двигателя (ДД) производится с помощью стартерного режима второй синхронной машины (СМ₂) с передачей вращающего момента $M_{\text{ст}}$ через первый редуктор (Р1) и муфту сцепления (МС). При этом первая синхронная машина (СМ₁) работает либо в режиме холостого хода, либо в качестве вспомогательного стартера. Выходной вал дифференциального редуктора (ДР) и во втором случае заторможен, так как стартерный момент СМ₁ ($M_{\text{ст}}$) меньше приведенного к ДР момента сопротивления $M_{\text{сопр}}$ колесных пар ($M_{\text{ст}} < M_{\text{сопр}}$); иначе для ускоренного запуска дизельного двигателя (ДД) понадобится дополнительное стопорное устройство или использование в стартерном режиме колодочных колесных тормозов. Питание синхронных машин в стартерном режиме осуществляется от аккумуляторной батареи (АБ) через тяговый статический преобразователь (ТСП).

Режим тяги при начале движения и последующем разгоне транспорта осуществляется с помощью дизельного двигателя. При этом роль машин СМ₁ и СМ₂, а также преобразователя ТСП сводится к регулированию, в частности, к стабилизации вращающих моментов на валах ДР ($M \cong \text{const}$). Это достигается регулированием «квазиреактивной» мощно-

сти, циркулирующей по замкнутому контуру: СМ₂-ТСП-СМ₁-ДР-Р1-СМ₂ (в указанном или обратном направлении). Одна из электромашин работает при этом в генераторном режиме, а другая — в двигательном. Регулирование вращающего момента на валу СМ₁, а следовательно, и всех моментов на валах ДР, осуществляется путем регулирования рабочих углов δ машин СМ_{1,2} при формировании синусоидальных напряжений на выходах ТСП.

В режиме торможения обе машины переводятся в режим генерирования, а кинетическая энергия транспорта рассеивается в тормозном резисторе (R_t) и частично (до 20%) — через компрессионные потери ДД. При этом часть энергии можно накапливать в маховых массах вала ДД (в «кинетическом накопителе»).

При питании от сети постоянного тока через токоприемник ТП и устройство заземления УЗ муфта сцепления (МС) и ДД выключаются, а разгон и торможение транспорта осуществляется с помощью обеих электромашин (СМ_{1,2}), работающих в режиме двигателей и генераторов соответственно. При этом реализуется и режим рекуперативного торможения в широком скоростном диапазоне.

Возвращение к приведенной, известной в принципе кинематической схеме и функциональной структуре становится рациональным на новом витке развития элементной базы силовой полупроводниковой электротехники, с использованием высоковольтных, силовоточных, относительно высокочастотных IGBT-транзисторов и IGBT-тиристов. Их появление и широкое использование позволяет находить и принципиально новые схемотехнические решения в построении статических преобразователей [6, 7].

Благодаря использованию дифференциального редуктора удается в несколько раз сократить объем и стоимость статических преобразователей по сравнению со схемой электрической трансмиссии [8].

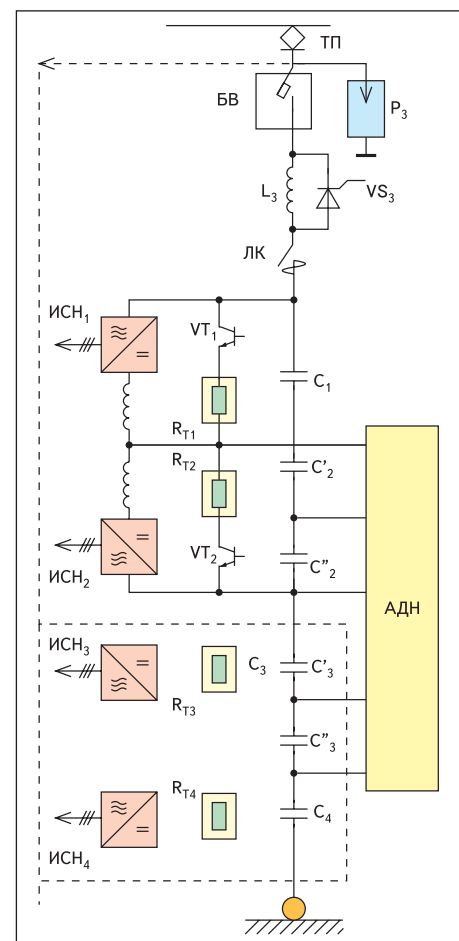


Рис. 3. Структурная схема тягового статического преобразователя на базе активного делителя напряжения (АДН) и инверторов синусоидального напряжения (ИСН)

На рис. 3 приведена предложенная и запатентованная авторами структурная схема тягового статического преобразователя на базе активного делителя напряжения (АДН) и четырех инверторов синусоидального напряжения (ИСН) [6, 7]. Самовыравнивание напряжений на конденсаторных звеньях С₁ и С₂, а также С₃ и С₄ осуществляется попарно благодаря трансформаторной связи выходов ИСН₁ и ИСН₂, а также ИСН₃ и ИСН₄ с помощью якорных обмоток синхронных машин СМ₁ и СМ₂ соответственно. Напряжения на средних звеньях С₂ и С₃ выравниваются с помощью активного делителя напряжения (АДН), схема которого приведена на рис. 4. В этой схеме попарное выравнивание напряжений на соседних звеньях емкостного делителя производится с помощью обратимых инвертирующих ШИМ-регуляторов на базе IGBT-транзисторов. Эти же регуляторы выполняют функцию передачи энергии от одной синхронной машины к другой (рис. 2).

На рис. 5 приведена схема обратимого трехфазного инвертора синусоидального напряжения, реализующая с помощью тех же инвертирующих ШИМ-регуляторов принцип «плавающих потенциалов» в емкостном

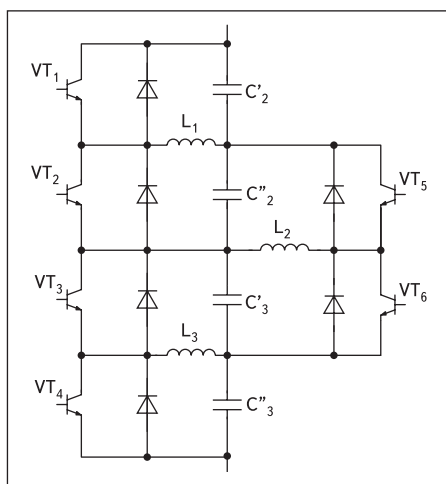


Рис. 4. Схема активного делителя напряжения

делителе напряжения. Подробно схема и ее работа описаны в [8]. Она позволяет реализовать обратимую взаимосвязь каналов питания постоянного и переменного тока с высокой массо-энергетической эффективностью (без дополнительных фильтров) и высоким качеством электроэнергии. При этом обеспечивается регулирование фазы, частоты и амплитуды синусоидального напряжения.

На начальной стадии проектирования вышеописанной трансмиссионной системы (рис. 2) одним из существенных вопросов является выбор рабочей точки для средней частоты вращения выходного вала дифференциального редуктора. Предлагается упрощенная методика такого выбора. Для этого обратимся к упрощенной расчетной структуре трансмиссии (рис. 6). Примем, как и ранее, что моменты на всех валах ДР равны между собой. В этом случае ДР описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{вых}} &= \omega_1 - \Delta\omega, \\ M_{\text{вых}} &= M_1 = M_2 = M. \end{aligned}$$

Примем следующие обозначения: $i_1 = \Delta\omega' / (-\Delta\omega)$ — коэффициент редукции повышающего редуктора; $k = \omega_{\text{вых.max}} / \omega_{\text{вых.min}}$ — кратность изменения частоты вращения выходно-

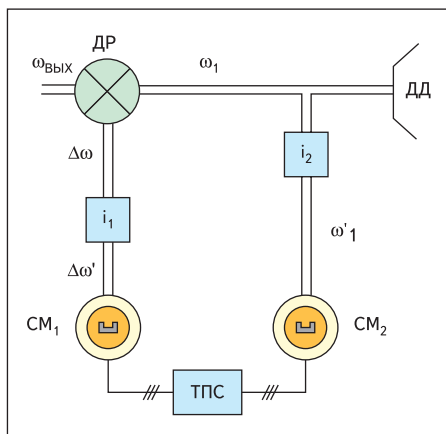


Рис. 6. Расчетная структура трансмиссии

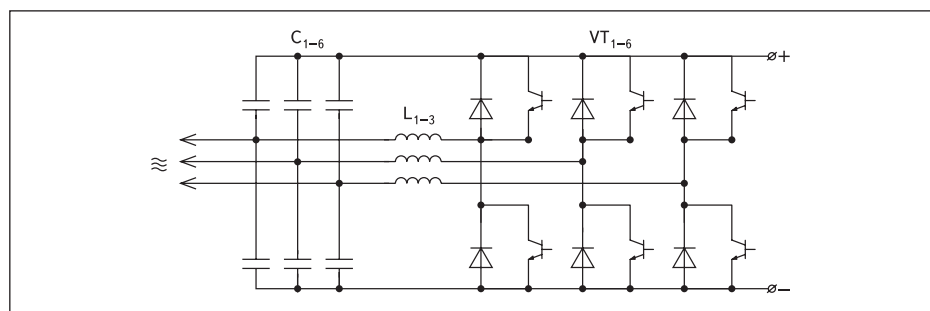


Рис. 5. Схема трехфазного инвертора синусоидального напряжения

го вала ДР в пути после разгона транспорта; $\omega_{\text{вых.ср}} = 0,5(\omega_{\text{вых.max}} + \omega_{\text{вых.min}})$ — средняя частота вращения выходного вала ДР; $\dot{\omega} = \omega_{\text{вых.ср}} / \omega_1$ — коэффициент, характеризующий искомую рабочую точку системы, то есть относительная средняя частота вращения выходного вала ДР; $M'_1 = M/i_1$ — момент на валу СМ₁.

Из приведенных выражений определим минимальные и максимальные значения частот вращения и моментов:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{\text{вых.min}} &= \frac{2\dot{\omega}\omega_1}{1+k}; \quad \omega_{\text{вых.max}} = \frac{2k\dot{\omega}\omega_1}{1+k}; \\ \Delta\omega_{\text{min}} &= \omega_1 \left(1 - \frac{2\dot{\omega}}{1+k} \right); \quad \Delta\omega_{\text{max}} = \omega_1 \left(1 - \frac{2k\dot{\omega}}{1+k} \right); \\ M_{\text{min}} &= \frac{P_D}{\omega_{\text{вых.max}}} = \frac{P_D(1+k)}{2k\dot{\omega}\omega_1}; \quad M_{\text{max}} = \frac{P_D(1+k)}{2\dot{\omega}\omega_1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где P_D — номинальная мощность двигателя.

Для упрощения выражений без существенного снижения их точности условно примем, что КПД СМ₁, СМ₂ и ТСП равен 100%. Индексы min и max в обозначениях $\Delta\omega_{\text{min}}$ и $\Delta\omega_{\text{max}}$ являются условными (просто крайними), поскольку в зависимости от режима работы $\Delta\omega_{\text{min}}$ может превышать $\Delta\omega_{\text{max}}$ и наоборот.

Установленную массу электрооборудования трансмиссионной системы оценим следующим образом. Поскольку электромагнитный момент электрической машины пропорционален ее объему, с достаточной степенью точности можно считать, что ее установленная масса также пропорциональна моменту. Поскольку установленная мощность ТСП приблизительно пропорциональна протекающему по нему максимальному току, который в свою очередь пропорционален электромагнитному моменту машины, то можно установленную массу электрооборудования системы представить в следующем виде:

$$G = m_1 M'_{1\text{max}} + m_2 M'_{2\text{max}} + m_{\text{ТСП}} M'_{1\text{max}}$$

или с учетом (1):

$$G = \frac{P_D}{\omega_1} \left[\frac{1+k}{2\dot{\omega}i_1} (m_1 + m_{\text{ТСП}}) + m_2 M'_{2\text{max}} \right], \quad (2)$$

где $m_1, m_2, m_{\text{ТСП}}$ (кг/Н·м) — относительные массы СМ₁, СМ₂ и ТСП соответственно. Выражение для M'_1 можно получить из уравнения баланса мощностей:

$$M'_1 \omega'_1 = M \Delta\omega,$$

откуда получаем:

$$M'_1 = M \frac{\Delta\omega}{\omega_1 i_2} = \frac{P_D (\omega_{\text{вых}} - \omega_1)}{\omega_{\text{вых}} \omega_1 i_2}. \quad (3)$$

Максимальное значение момента M'_1 соответствует границам рабочего диапазона изменения $\omega_{\text{вых}}$ и может равняться:

$$M'_{1\text{max}} = \frac{P_D}{\omega_1 i_2} \left| 1 - \frac{1+k}{2\dot{\omega}} \right|$$

или (4)

$$M'_{1\text{max}} = \frac{P_D}{\omega_1 i_2} \left| 1 - \frac{1+k}{2k\dot{\omega}} \right|.$$

Из (2) видно, что с увеличением коэффициента редукции i_1 установленная масса электрооборудования снижается. Максимальное значение i_1 ограничивается двумя параметрами: максимальной частотой вращения вала и предельной окружной скоростью ротора СМ₁. Выражение для коэффициента редукции при ограничении частоты вращения вала СМ₁ имеет следующий вид:

$$i_1 = \frac{\Delta\omega'_{\text{max}}}{|\omega_{\text{вых}} - \Delta\omega|_{\text{max}}}, \quad (5)$$

где $\Delta\omega$ — заданная максимальная частота вращения вала СМ₁. При ограничении предельной окружной скорости ротора СМ₁ значение коэффициента редукции может быть получено следующим образом. Электромагнитная мощность синхронной машины определяется выражением:

$$S = D^3 \lambda n \sigma, \quad (6)$$

где D — диаметр рашетки статора; $\lambda = l/D$ — конструктивный коэффициент; l — активная длина статора; n — частота вращения ротора, об/мин; σ — коэффициент использо-

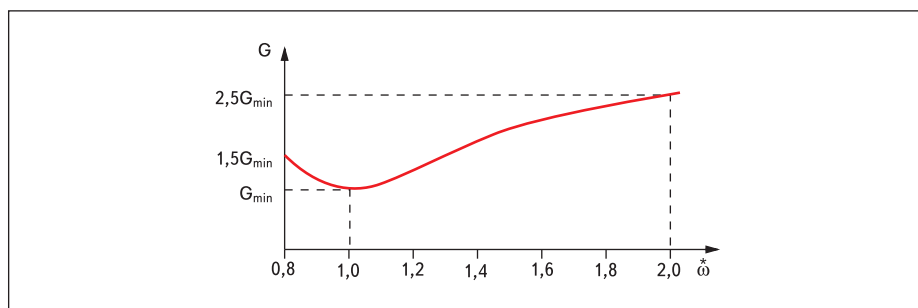


Рис. 7. Обобщенная зависимость массы электрооборудования трансмиссии от выбора рабочей точки

вания. Учитывая, что линейная скорость ротора $v = 0,5\Delta\omega'D$, момент на валу CM_1 будет

$$M'_1 = \frac{240v^3\lambda\sigma}{\pi\Delta\omega'^3}. \quad (7)$$

Из (7) определяем момент на валу ДР:

$$M = M'_1 i_1 = \frac{240v^3\lambda\sigma}{\pi\omega_2^3 i_1^2}. \quad (8)$$

Приравняв выражения (8) и (1) при минимальной и максимальной частоте вращения $\omega_{\text{вых}}$, получаем для коэффициента редукции:

$$i_1 = \frac{1+k}{\omega_1} \sqrt{\frac{480\lambda\sigma v_{\text{пред}}^3 k \omega^*}{\pi P_{\text{д}} (2k\omega^* - k - 1)^3}} \quad \text{при } \omega_{\text{вых}} = \omega_{\text{вых.max}}; \quad (9)$$

$$i_1 = \frac{1+k}{\omega_1} \sqrt{\frac{480\lambda\sigma v_{\text{пред}}^3 k \omega^*}{\pi P_{\text{д}} (2\omega^* - k - 1)^3}} \quad \text{при } \omega_{\text{вых}} = \omega_{\text{вых.min}}; \quad (10)$$

где $v_{\text{пред}}$ — предельная линейная скорость ротора.

Таким образом, сначала i_1 определяется из (6). Затем проверяется значение линейной скорости ротора CM_1 по следующим выражениям, полученным из (9) и (10):

$$v_{CM_1} = \left| 2k\omega^* - 1 - k \right| \sqrt[3]{\frac{\pi P_{\text{д}} i_1^2 \omega_1^2}{480\omega^* \lambda \sigma k (1+k)^2}}; \quad (11)$$

$$v_{CM_1} = \left| 2\omega^* - 1 - k \right| \sqrt[3]{\frac{\pi P_{\text{д}} i_1^2 \omega_1^2}{480\omega^* \lambda \sigma (1+k)^2}}.$$

Если v_{CM_1} превышает предельное значение $v_{\text{пред}}$, то значение коэффициента редукции определяется по выражениям (9), (10), принимая при этом наименьшее значение из них.

Значение i_2 выбирается либо по предельной частоте вращения или линейной окружной скорости ротора CM_2 , либо исходя из требований, определяемых специальными режи-

мами работы системы (например, стартерным или тормозным).

На рис. 7 представлена приближенная обобщенная расчетная зависимость $G = f(\omega)$ при различных реальных сочетаниях исходных данных ($P_{\text{д}}$, $m_1 \cong m_2$, $m_{\text{ТСП}}$, ω_1 , k , $\Delta\omega'_{\text{max}}$, i_2 , λ , σ , $v_{\text{пред}}$). Из нее следует, что оптимальной рабочей точкой является $\omega \cong 1$; то есть при изменении частоты выходного вала ДР от минимальной до максимальной частота вращения $CM_1 \Delta\omega$ изменяется от некоторого положительного значения до такого же по абсолютной величине отрицательного значения. ■

Литература

1. Бертинов А. И. Авиационные электрические генераторы. М.: ОборонГиз, 1959.
2. Сиднев И. М. Электроснабжение летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1982.
3. Брускин Д. Э., Коробанов Н. Т. и др. Основы электрооборудования летательных аппаратов. Том I. М.: Высшая школа, 1978.
4. Бочаров В. В., Грачев Л. Н., Кондаков Л. И., Резников С. Б., Смирнов С. В., Токарь И. И. Анализ массоэнергетических показателей систем генерирования с электромеханическим приводом постоянной частоты вращения // Электричество. 1988. № 3.
5. Бертинов А. И., Бочаров В. В., Кондаков Л. И., Мизюрин С. Р., Резников С. Б., Смирнов С. В., Токарь И. И. Перспективы развития автономных систем генерирования переменного тока стабильной частоты // Электричество. 1988. № 10.
6. Патент РФ на полезную модель № 33274 от 10.09.2003. Обратимый импульсный преобразователь постоянных напряжений / Резников С. Б., Молочников А. Ю.
7. Патент РФ на полезную модель № 37293 от 10.04.2004. Преобразователь постоянного напряжения с конденсаторным делителем / Белащенко М. Д., Ламанов А. В., Резников С. Б., Савенков А. И.
8. Резников С., Булеков В., Болдырев В., Бочаров В. Новый принцип обратимого выпрямительно-инверторного преобразования с ШИМ-коррекцией мощности // Силовая электроника. 2005. № 1.
9. Резников С., Чуев Д., Савенков А. Новая структура универсальной тяговой схемы дизель-электропоезда с импульсным регулированием и защитой от перенапряжений // Силовая электроника. 2005. № 3.