

УДК: 629.4.016.2

## Определение затрат энергии в синхронных тяговых генераторах тепловозов при различных режимах нагружения

Д. Н. Курилкин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Курилкин Д. Н. Определение затрат энергии в синхронных тяговых генераторах тепловозов при различных режимах нагружения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 286–297. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-286-297

### Аннотация

**Цель:** Разработка методики определения затрат энергии в синхронных тяговых генераторах в зависимости от реализуемого режима нагружения. Для выполнения расчета тяговой характеристики тепловоза необходимо получить аналитические зависимости потерь энергии в синхронном тяговом генераторе от частоты вращения его вала, тока и напряжения на выходе выпрямительной установки. **Методы:** Исследование всех составляющих потерь энергии в тяговом синхронном генераторе. **Результаты:** Определены значения затрат мощности на преобразование энергии в синхронном тяговом генераторе. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют уточнить величину затрат энергии в тяговом приводе локомотивов и повысить точность тяговых расчетов.

**Ключевые слова:** Энергоэффективность, синхронный тяговый генератор, к.п.д. синхронного тягового генератора, тяговый привод.

### Введение

Вопросам повышения энергоэффективности локомотивной тяги посвящено большое количество трудов российских и зарубежных ученых. При этом в большинстве случаев используют паспортные параметры тяговых и энергетических характеристик локомотивов [1–3].

Решение задачи повышения энергоэффективности локомотивной тяги за счет оптимизации режимов управления локомотивом предполагает выполнение предварительных вариантов

тяговых расчетов, точность которых во многом определяется достоверностью исходных данных, в том числе информацией о реальных тяговых и энергетических характеристиках локомотивов.

Несмотря на то, что уровень энергоэффективности тепловоза в эксплуатации в основном определяется техническим и теплотехническим состоянием его дизеля [4], пренебрегать переменным характером потерь в элементах тягового привода недопустимо, особенно в режимах, отличных от номинальных.

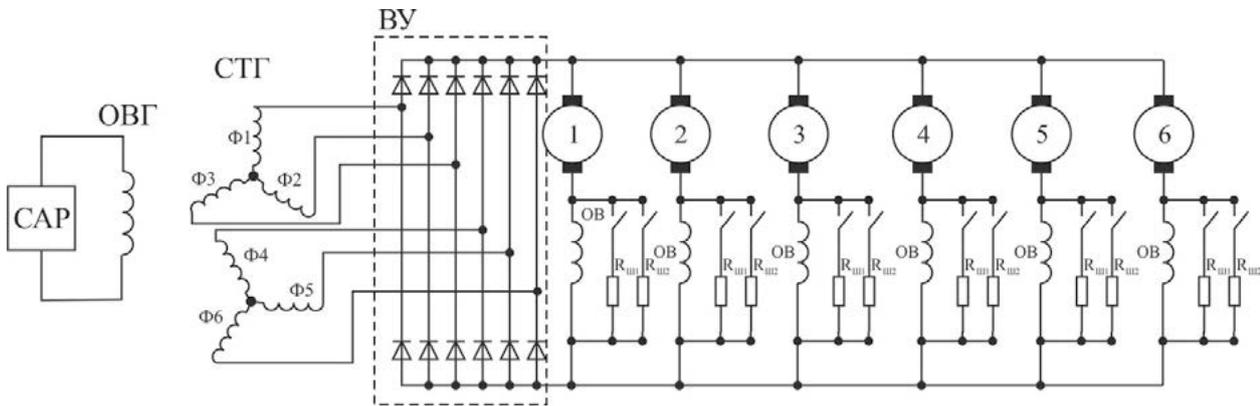


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема силовой цепи тепловоза с неуправляемой шестифазной выпрямительной установкой

Целью данной работы является разработка практически ориентированной методики расчета потерь энергии в тяговом синхронном генераторе тепловоза для расчета уточненной тяговой характеристики. При этом значения потерь должны рассчитываться с использованием параметров, регистрируемых средствами бортовой диагностики тепловоза — частоты вращения коленчатого вала дизеля, напряжений и токов на выходе выпрямительной установки. Расчет выполнен для генераторов ГС-501А и ГСТ-2800-1000 тепловозов 2ТЭ116У (2ТЭ25КМ) и ТЭП70БС [5].

### 1. Составляющие потерь энергии в синхронном тяговом генераторе

В соответствии с [6, 7] мощность потерь в синхронном тяговом генераторе может быть представлена суммой следующих составляющих:

$$\sum \Delta P_{\Gamma} = \Delta P_{\Gamma_{\text{эл}}} + \Delta P_{\Gamma_{\text{мех}}} + \Delta P_{\Gamma_{\text{магн}}} + \Delta P_{\Gamma_{\text{хх}}} + \Delta P_{\Gamma_{\text{доб}}} + \Delta P_{\text{возб}}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{\Gamma_{\text{эл}}}$  — мощность электрических потерь, Вт;  $\Delta P_{\Gamma_{\text{мех}}}$  — мощность механических потерь, Вт;  $\Delta P_{\Gamma_{\text{магн}}}$  — мощность основных магнитных потерь в сердечнике статора, Вт;  $\Delta P_{\Gamma_{\text{хх}}}$  — мощ-

ность добавочных потерь холостого хода, Вт;  $\Delta P_{\Gamma_{\text{доб}}}$  — мощность добавочных нагрузочных потерь, Вт;  $\Delta P_{\text{возб}}$  — затраты энергии на возбуждение тягового генератора.

Расчет затрат энергии на возбуждение синхронного тягового генератора по данным средств бортовой диагностики был рассмотрен ранее [8].

### Мощность электрических потерь

Мощность электрических потерь в обмотке статора тягового синхронного генератора (ТСГ) может быть определена по следующей зависимости:

$$\Delta P_{\Gamma_{\text{эл}}} = \sum_{i=1}^6 (I_{\Gamma_{\text{фи}}}^2 \cdot r_{\text{фи}}), \quad (2)$$

где  $i$  — номер фазы генератора;  $I_{\Gamma_{\text{фи}}}$  — фазный ток обмотки статора, А;  $r_{\text{фи}}$  — активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом.

На тепловозах ТЭП70БС, 2ТЭ116 статорные обмотки ротора нагружены на одну неуправляемую выпрямительную установку с мостовой схемой выпрямления (рис. 1).

Для тепловозов 2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ, имеющих поосное регулирование тяговых электродвигателей (ТЭД), трехфазная обмотка статора включена на три полностью управляемых трехфазных

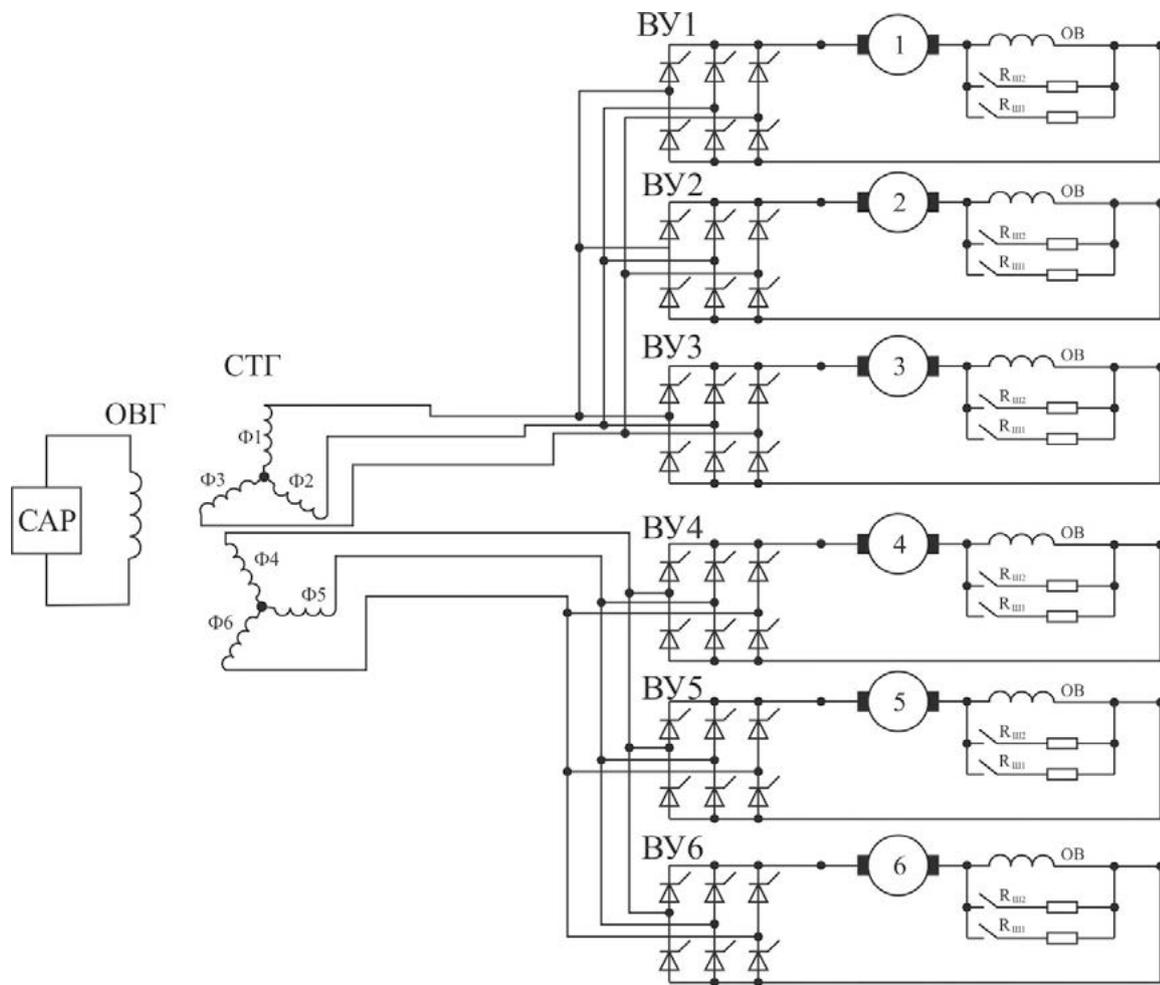


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема силовой цепи тепловоза с поосным регулированием напряжения тяговых двигателей

выпрямителя, каждый из которых осуществляет питание одного тягового двигателя (рис. 2).

В соответствии с [7] паспортное значение активного сопротивления фазы обмотки статора для рассматриваемых синхронных тяговых генераторов составляет:  $r_{\phi i} = 0,0011$  Ом.

Значения фазных токов тягового генератора определяется из соотношения [6]:

$$I_{\Gamma\phi} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d = \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot \sum_{j=1}^6 I_j, \quad (3)$$

где  $I_d$  — действующее значение тока на выходе выпрямительной установки, А;  $I_j$  — ток, про-

текающий через якорь  $j$ -го тягового двигателя, А.

С учетом выражения (3) мощность электрических потерь в статоре синхронного тягового генератора может быть определена по следующей зависимости:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Gamma\text{эл}} &= I_{\Gamma\phi}^2 \cdot \sum_{i=1}^6 (r_{\phi i}) = \\ &= \frac{1}{6} \left( \sum_{j=1}^6 I_j \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^6 r_{\phi i} = \left( \sum_{j=1}^6 I_j \right)^2 \cdot r_{\phi}. \end{aligned} \quad (4)$$

При использовании шести независимых управляемых трехфазных выпрямителей зависи-

мости для определения фазных токов ТСГ будут иметь иной вид:

$$\begin{aligned} I_{Г\phi 1} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (I_1 + I_2 + I_3) = \\ &= 0,8165 \cdot (I_1 + I_2 + I_3); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_{Г\phi 2} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (I_4 + I_5 + I_6) = \\ &= 0,8165 \cdot (I_4 + I_5 + I_6), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $I_{Г\phi 1}, I_{Г\phi 2}$  — фазные токи обмоток статора ТСГ, А;  $I_1 - I_6$  — токи тяговых двигателей, А.

С учетом зависимостей (5) и (6) выражение (2) примет вид:

$$\Delta P_{Гэл} = 2 \cdot r_{\phi} \left( (I_1 + I_2 + I_3)^2 + (I_4 + I_5 + I_6)^2 \right). \quad (7)$$

При одинаковых токах ТЭД, равных 700А, мощность электрических потерь в ТСГ составит 19,4кВт.

### Мощность механических и вентиляционных потерь

Механические потери в генераторе, представляющие собой сумму потерь на трение в подшипниках, на контактных кольцах и вентиляционных потерь, могут быть определены по следующей зависимости [6, 7]:

$$\Delta P_{Гмех} = 3,68 \cdot p \cdot \left( \frac{v_{ор}}{40} \right)^3 \cdot \sqrt{l_{ст}} \cdot 10^3, \text{ Вт}, \quad (8)$$

где  $v_{ор}$  — окружная скорость вращения ротора, м/с;  $p = 6$  — число пар полюсов;  $l_{ст}$  — полная длина сердечника статора, мм.

После элементарных преобразований она может быть представлена в виде:

$$\Delta P_{Гмех} = K_{мех} \cdot n_{диз}^3, \quad (10)$$

где  $K_{мех}$  — постоянный коэффициент механических потерь, определяемый по зависимости:

$$K_{мех} = 3680 \cdot p \cdot \left( \frac{\pi \cdot D_{\delta}}{2400} \right)^3 \cdot \sqrt{l_{ст}}. \quad (11)$$

где  $D_{\rho}$  — диаметр ротора (м). Полная длина сердечника статора в выражение (11) подставляется в м.

Для тягового генератора ГС-501А:

$$\begin{aligned} K_{мех} &= 3680 \cdot 6 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 1,22}{2400} \right)^3 \cdot \sqrt{0,300} = \\ &= 0,00004926. \end{aligned}$$

Для тягового генератора ГСТ-2800-1000:

$$\begin{aligned} K_{мех} &= 3680 \cdot 6 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 1,22}{2400} \right)^3 \cdot \sqrt{0,326} = \\ &= 0,00005135. \end{aligned}$$

Таким образом, при номинальной частоте вращения ротора 1000 об/мин механические потери в генераторе ГС-501А составят 49,26 кВт, а при частоте вращения 350 об/мин, соответствующей первой позиции контроллера, механические потери составят 2,11 кВт. У генератора ГСТ-2800-1000 величина потерь для частот вращения 350 об/мин и 1000 об/мин составит 2,2 кВт и 51,35 кВт соответственно.

### Мощность магнитных потерь

Магнитные потери в статоре ТСГ определяются как сумма магнитных потерь в спинке статора  $\Delta P_{мсс}$  и потерь в зубцовой зоне статора  $\Delta P_{мзз}$ :

$$\Delta P_{Гмагн} = \Delta P_{мсс} + \Delta P_{мзз}. \quad (12)$$

Основные магнитные потери в спинке статора и зубцовой зоне статора могут быть определены из соотношений [7]:

$$\Delta P_{\text{мсс}} = k_{\text{мт}} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot B_{\text{сц}}^2 \cdot G_{\text{сц}}, \text{ Вт}; \quad (13)$$

$$\Delta P_{\text{мзз}} = k_{\text{мт}} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot B_{\text{зс}}^2 \cdot G_{\text{зс}}, \text{ Вт}, \quad (14)$$

где  $k_{\text{мт}} = 1,7$  — технологический коэффициент, учитывающий увеличение магнитных потерь из-за наличия в сердечнике статора дефектов, возникающих при штамповке листов, их сборке и последующей обработке пакетов;  $\beta$  — показатель степени, зависящий от марки стали;  $P_{1,0/50}$  — удельные магнитные потери в стали весом 1 кг при перемагничивании с частотой 50 Гц в магнитном поле с индукцией 1 Тл;  $f$  — частота выходного напряжения, Гц;  $B_{\text{сц}}$  и  $B_{\text{зс}}$  — индукция в спинке и зубцах статора соответственно, Тл;  $G_{\text{сц}}$  и  $G_{\text{зз}}$  — масса стали спинки статора и зубцовой зоны соответственно, кг.

С учетом  $f = \frac{p \cdot n_{\text{диз}}}{60}$  зависимости (12) и (13)

могут быть представлены в следующем виде:

$$\Delta P_{\text{мсс}} = k_{\text{мт}} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{p}{3000}\right)^{\beta} \cdot G_{\text{сц}} \cdot B_{\text{сц}}^2 \cdot n_{\text{диз}}^{\beta}, \text{ Вт}; \quad (16)$$

$$\Delta P_{\text{мзз}} = k_{\text{мт}} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{p}{3000}\right)^{\beta} \cdot G_{\text{зз}} \cdot B_{\text{зс}}^2 \cdot n_{\text{диз}}^{\beta}, \text{ Вт}. \quad (17)$$

Статор тяговых генераторов набирается из листов стали Э-43, предназначенной для магнитных цепей электрических машин. Для данной марки стали удельные магнитные потери  $P_{1,0/50}$

составляют 1,25 Вт/кг, а показатель степени  $\beta$  равен 1,5 [7, 9]. Масса стали спинки статора  $G_{\text{сц}}$  для генератора ГС-501А может быть принята равной 930 кг, а масса стали в зубцовой зоне  $G_{\text{зз}}$  равна 271 кг. Для генератора ГСТ-2800-1000 эти значения составят 1011 и 294 кг соответственно.

Значения индукции в зубцовой зоне и спинке статора определяются по следующим зависимостям:

$$B_{\text{зз}} = \frac{t_1}{(t_1 - b_{\text{п}}) \cdot k_{\text{с}}} \cdot \frac{10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_{\text{ст}}} \cdot \Phi, \text{ Тл}; \quad (18)$$

$$B_{\text{сц}} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau}{h_{\text{с}} \cdot k_{\text{с}}} \cdot \frac{10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l} \cdot \Phi, \text{ Тл}. \quad (19)$$

где  $t_1$  — зубцовое деление статора, м;  $b_{\text{п}}$  — ширина паза статора, м;  $k_{\text{с}}$  — коэффициент заполнения сердечника сталью;  $\alpha_i$  — коэффициент полюсного перекрытия;  $\tau$  — длина полюсной дуги, м;  $h_{\text{с}}$  — высота сердечника статора, м;  $\Phi$  — магнитный поток полюсов ротора, Вб.

Магнитный поток определяется по следующей зависимости (Вб) [7]:

$$\Phi = \frac{E_{\text{Гф}}}{4 \cdot k_{\text{в}} \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{\text{об}}}, \text{ Вб}, \quad (20)$$

где  $E_{\text{Гф}}$  — э.д.с. фазы обмотки статора, В;  $k_{\text{в}} = 1,1-1,15$  — коэффициент формы поля, зависящий от коэффициента полюсного перекрытия;  $w_1 = 12$  — число витков фазы обмотки;  $k_{\text{об}} = 0,92-0,96$  — обмоточный коэффициент.

Фазное значение э.д.с. синхронного тягового генератора определяется исходя из выражения:

$$E_{\text{Гф}} = U_{\text{Гф}} + I_{\text{Гф}} \cdot r_{\text{ф}}, \text{ В} \quad (21)$$

где  $U_{\text{Гф}}$  — фазное напряжение генератора, В.

Фазное напряжение генератора  $U_{\text{Гф}}$  в схемах выпрямления показанных на рис. 1 и 2 определяется по зависимости:

$$U_{ГФ} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot U = 0,4275 \cdot U, \text{ В}, \quad (22)$$

где  $U$  — действующее значение выпрямленного напряжения, приложенного к тяговому двигателю, В.

Выполнив элементарные подстановки и заменив частоту напряжения тягового генератора  $f$  на частоту вращения вала дизель-генераторной установки  $n_{диз}$ , получим следующие соотношения:

$$B_{зз} = \frac{15 \cdot 10^6 \cdot t_1}{(t_1 - b_i) \cdot k_c \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot l_{ст} \cdot k_b \cdot p \cdot w_1 \cdot k_{об}} \times \frac{E_{ГФ}}{n_{диз}}, \text{ Тл}. \quad (23)$$

$$B_{cc} = \frac{7,5 \cdot 10^6}{h_{ст} \cdot k_{св} \cdot l \cdot k \cdot p_{об} \cdot w_1 \cdot k_{диз}} \cdot \frac{E_{ГФ}}{n}, \text{ Тл}. \quad (24)$$

После выполнения всех подстановок выражения (15) и (16) примут вид:

$$\Delta P_{мсс} = k_{мг} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{p}{3000}\right)^B \cdot G_{cc} \times \left(\frac{7,5 \cdot 10^6}{h_{ст} \cdot k_{св} \cdot l \cdot k \cdot p_{об} \cdot w_1 \cdot k}\right)^2 \cdot \frac{E_{ГФ}^2}{n_{диз}^{2-\beta}}, \text{ Вт}; \quad (25)$$

$$\Delta P_{мзз} = k_{мг} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{p}{3000}\right)^B \cdot G_{зз} \times \left(\frac{15 \cdot 10^6 \cdot t_1}{(t_1 - b_i) \cdot k_c \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot l \cdot k \cdot p \cdot w_1 \cdot k}\right)^2 \times \frac{E_{ГФ}^2}{n_{диз}^{2-\beta}}, \text{ Вт}. \quad (26)$$

С учетом того, что все составляющие выражений (24) и (25), за исключением  $E_{ГФ}$  и  $n_{диз}$ , представляют собой постоянные параметры ТСГ, выражение (12) можно представить в следующем виде:

$$\Delta P_{магн} = \Delta P_{мсс} + \Delta P_{мзз} = K_{магн} \cdot \frac{E_{ГФ}^2}{n_{диз}^{2-\beta}}, \text{ Вт}, \quad (27)$$

где  $K_{магн}$  — постоянный коэффициент магнитных потерь в спинке и в зубцовой зоне статора, определяемый по следующей зависимости:

$$K_{магн} = k_{мг} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{p}{3000}\right)^B \times \left(\frac{7,5 \cdot 10^6}{k_c \cdot l_{ст} \cdot k_b \cdot p \cdot w_1 \cdot k_{об}}\right)^2 \times \left[G_{cc} \cdot \left(\frac{1}{h_c}\right)^2 + G_{зз} \cdot \left(\frac{2 \cdot t_1}{(t_1 - b_{п}) \cdot \alpha_i \cdot \tau}\right)^2\right]. \quad (28)$$

Значение коэффициента  $K_{магн}$  для ТСГ ГС-501А составляет 4,175, для ГСТ-2800-1000 значение этого коэффициента равно 3,84.

Зависимость мощности магнитных потерь от частоты вращения ротора и фазной э.д.с. тяговых генераторов показано на рис. 3 и 4.

Из приведенных результатов расчета следует, что мощность магнитных потерь может достигать 20 кВт и уменьшается по мере увеличения частоты вращения ротора.

### Мощность добавочных потерь холостого хода

Добавочные потери холостого хода в синхронном тяговом генераторе представляют собой поверхностные потери в полюсных наконечниках и вызываются изменением магнитной индукции из-за зубчатости внутренней поверхности сердечника статора. В соответствии с [7] они определяются по зависимости:

$$\Delta P_{ГХХ} = k_i \cdot p \cdot b_{\delta} \cdot l_{ст} \cdot (z_i \cdot n_{диз} \cdot 10^{-4})^{1,5} \times (B_{\delta} \cdot (k_{\lambda} - 1) \cdot t_1)^2 \cdot 10^{-6}, \text{ Вт}, \quad (29)$$

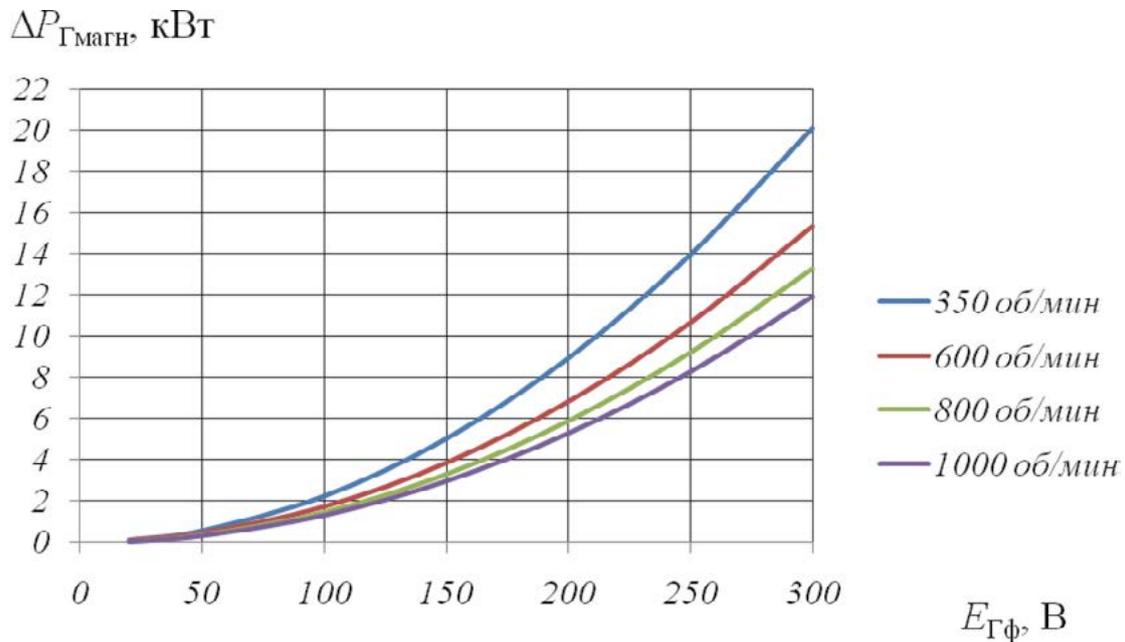


Рис. 3. Результаты определения магнитных потерь для синхронного тягового генератора ГС-501А

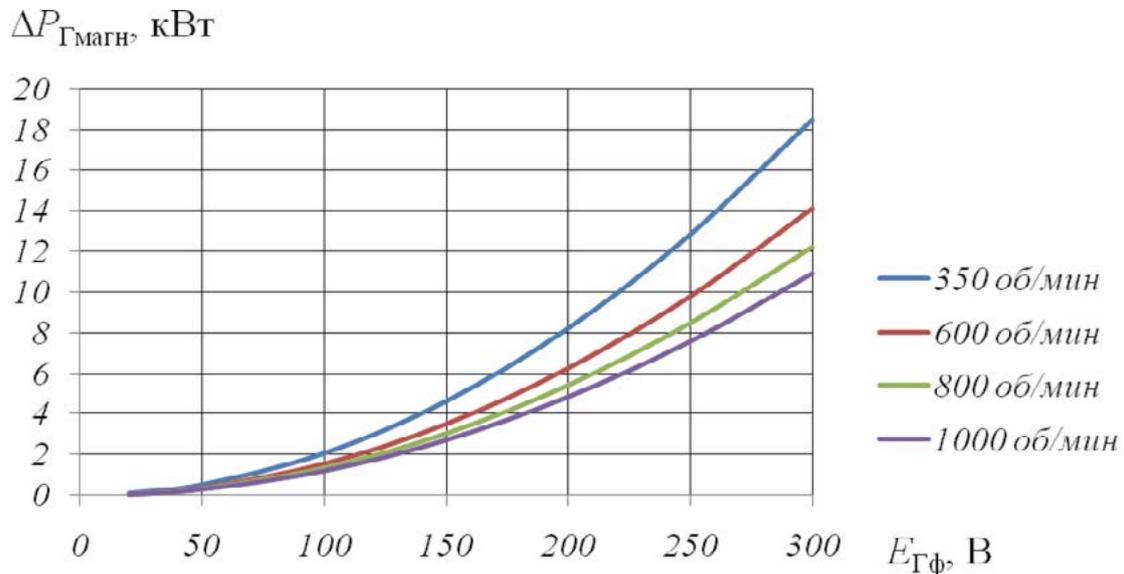


Рис. 4. Результаты определения магнитных потерь для синхронного тягового генератора ГСТ-2800-1000

где  $B_{\delta}$  — магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл;  $k_{\text{п}}$  — коэффициент, определяемый толщиной листов полюсных наконечников;  $b_p$  — ширина полюсного наконечника, мм;  $z_n$  — число пазов обмотки статора;  $k_{\delta 1}$  — коэффициент воздушного зазора статора.

С учетом толщины стали полюсов ротора синхронных тяговых генераторов (1,4 мм [5, 10]), коэффициент  $k_{\text{п}}$  может быть принят равным 6,2.

Ширина полюсного наконечника для синхронных тяговых генераторов ГС-501А и ГСТ-2800-1000 может быть принята равной 225 мм.

Коэффициент воздушного зазора статора определяется согласно зависимости [7]:

$$k_{\delta l} = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta_{cp}}{t_1 - b_p + 10 \cdot \delta_{cp}}, \quad (30)$$

где  $\delta_{cp}$  — среднее значение воздушного зазора, которое может быть определено исходя из соотношения:

$$\delta_{cp} = \delta + \frac{\delta_{max} - \delta}{3}, \text{ мм}, \quad (31)$$

где  $\delta$  — воздушный зазор по центру полюса, мм;  $\delta_{max}$  — воздушный зазор по краю полюса, мм.

В соответствии с [5], среднее значение воздушного зазора составит 5,84 мм для синхронного тягового генератора ГС-501А и 6,17 мм для тягового синхронного генератора ГСТ-2800-1000.

После подстановки величины среднего воздушного зазора коэффициент воздушного зазора статора составит 1,161 для тягового синхронного генератора ГС-501А и 1,154 для тягового генератора ГСТ-2800-1000.

Выполнив ряд элементарных преобразований с заменой магнитной индукции в воздушном зазоре на магнитный поток [7] и воспользовавшись выражением (20), получим следующую зависимость для определения мощности добавочных потерь холостого хода:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ГХХ} = & k_p \cdot p \cdot b_p \cdot l_{ст} \cdot (z_i \cdot 10^{-4})^{1,5} \times \\ & \times (k_{\delta l} - 1)^2 \cdot t_1^2 \cdot \left( \frac{10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_{ст}} \right)^2 \cdot n_{диз}^{1,5} \times \\ & \times \left( \frac{15}{k_b \cdot p \cdot w_1 \cdot k_{об}} \right)^2 \cdot \left( \frac{E_{ГФ}}{n_{диз}} \right)^2, \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (32)$$

Вычленив постоянные составляющие и произведя ряд элементарных преобразований, выражение (32) можно представить в виде:

$$\Delta P_{ГХХ} = K_{ГХХ} \cdot \frac{E_{ГФ}^2}{n_{диз}^{0,5}}, \quad (33)$$

где  $K_{ГХХ}$  — постоянный коэффициент для определения дополнительных потерь холостого хода, определяемый по зависимости:

$$\begin{aligned} K_{ГХХ} = & k_p \cdot p \cdot b_p \cdot l_{ст} \cdot (z_p \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot (k_{\delta l} - 1)^2 \times \\ & \times t_1^2 \cdot \left( \frac{10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_{ст}} \right)^2 \cdot \left( \frac{15}{k_b \cdot p \cdot w_1 \cdot k_{об}} \right)^2 \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \quad (34)$$

Для тягового генератора ГС-501А величина коэффициента  $K_{ГХХ}$  составит 0,829, а для тягового генератора ГСТ-2800-1000 величина коэффициента  $K_{ГХХ}$  составит 0,698.

Зависимость мощности добавочных потерь холостого хода от частоты вращения ротора и фазной э.д.с. тягового генератора показана на рис. 5 и 6.

Как видно из представленных результатов, мощность добавочных потерь холостого хода может составлять до 4кВт и уменьшается с увеличением частоты вращения ротора.

### Мощность добавочных потерь при нагрузке

Добавочные потери при нагрузке  $\Delta P_{Гдоб}$  представляют собой потери в обмотке статора от вихревых токов, потери в стали статора и полюсных наконечниках ротора от высших гармоник магнитного поля. Добавочные потери при нагрузках в синхронных машинах определяют приближенно как часть полезной мощности тягового генератора. Согласно [11], для синхронного тягового генератора мощность добавочных потерь может быть принята равной 0,4 % от мощности генератора или 0,5 % от мощности на зажимах ВУ [6]:

$$\Delta P_{Гдоб} = 0,004 \cdot P_{Гвых} = 0,005 \cdot \sum (U_i \cdot I_i). \quad (35)$$

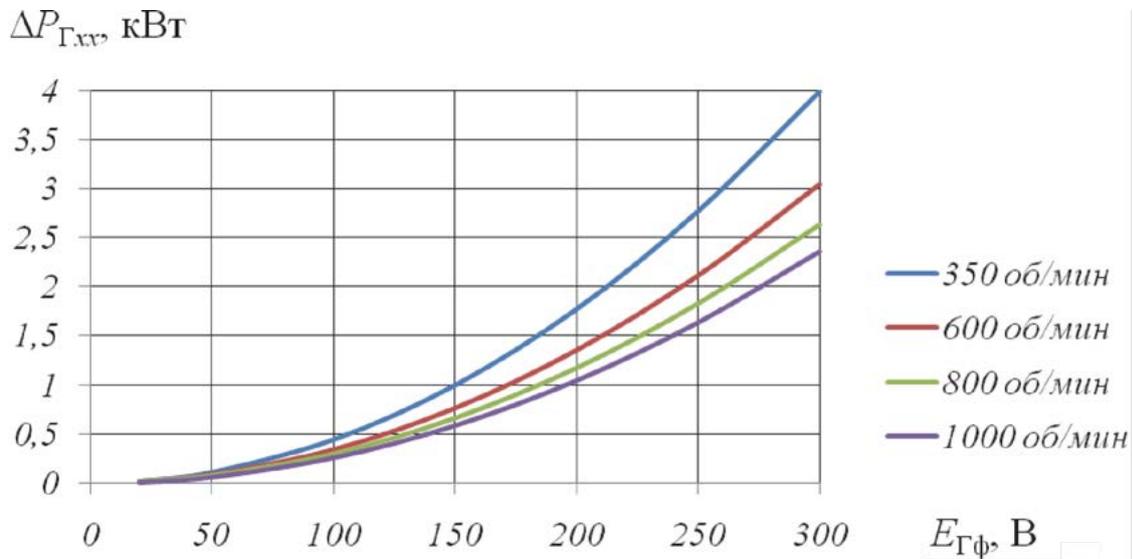


Рис. 5. Результаты определения добавочных потерь холостого хода для синхронного тягового генератора ГС-501А

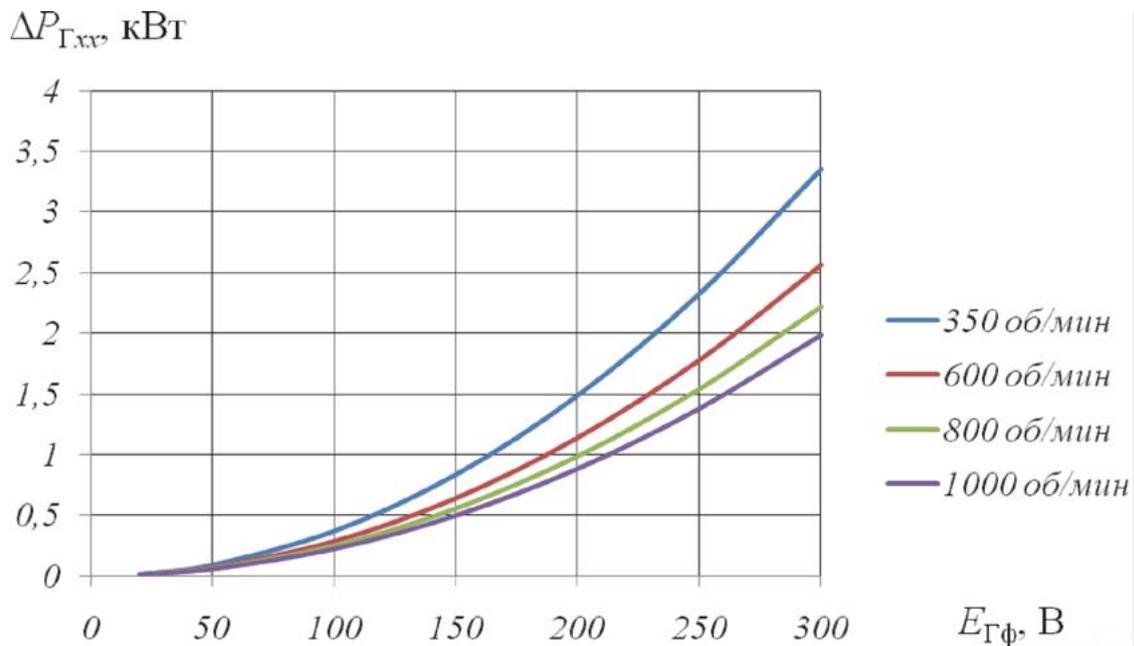


Рис. 6. Результаты определения добавочных потерь холостого хода для синхронного тягового генератора ГСТ-2800-1000

### Выводы

1. В результате выполненной работы предложена методика определения мощности потерь в синхронных тяговых генераторах при различных режимах нагружения.

2. Все составляющие потерь могут быть определены с использованием значений частоты вращения вала дизеля, токов и напряжений тяговых электродвигателей, регистрируемых бортовыми средствами диагностики тепловоза.

3. Мощность электрических потерь при номинальных значениях токов тяговых двигателей достигает 20 кВт.

4. Мощность механических потерь при номинальной частоте вращения достигает 50 кВт.

5. Мощность магнитных потерь в номинальном режиме работы ТСГ составляет 20 кВт, а мощность добавочных потерь холостого хода составляет 4 кВт, причем с уменьшением частоты вращения ротора эти потери увеличиваются.

Работа выполнена в рамках гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

### Библиографический список

1. Баранов Л. А. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Гинь; под ред. Л. А. Баранова. — М.: МИИТ, 2011. — 164 с.

2. Юренко К. И. Математическое моделирование энергооптимальных режимов ведения поезда с учетом возмущений / К. И. Юренко, А. Н. Савоськин, Е. И. Фандеев // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2015. — № 3. — С. 34–44.

3. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. — М.: Интекст, 2012. — 80 с.

4. Перминов В. А. Влияние технического состояния вспомогательного оборудования тепловозов на их энергоэффективность в эксплуатации / В. А. Перминов, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин, И. Э. Нестеров // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. — 2015. — № 97. — С. 45–58.

5. Грищенко А. В. Новые электрические машины локомотивов: Учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / А. В. Грищенко, Е. В. Казаченко. — М.: ГОУ «Учебного методического центра по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. — 271 с.

6. Гаккель Е. Я. Электрические машины и электрооборудование тепловозов: учебник для вузов ж. д. трансп. / Е. Я. Гаккель, К. И. Рудая, И. Ф. Пушкарев и др.; под ред. Е. Я. Гаккель. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1981 — 256 с.

7. Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин: учебное пособие для техникумов / М. М. Кацман. М.: Энергоатомиздат, 1984. — 360 с.

8. Курилкин Д. Н. Определение затрат энергии на возбуждение синхронного тягового генератора по данным микропроцессорных систем управления для прогнозирования тяговой характеристики локомотива / Д. Н. Курилкин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 103–117.

9. ГОСТ 21427.3—75. Сталь электротехническая горячекатаная тонколистовая.

10. Марченко В. С. Электрооборудование тепловозов: справочник / В. С. Марченко, А. А. Сергеев, В. Т. Иванченко и др. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. — 248 с.

11. ГОСТ 2582—2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.

Дата поступления: 12.04.2022

Решение о публикации: 28.04.2022

### Контактная информация:

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич — канд. техн. наук;  
kurilkin\_d@mail.ru

## Determination of Energy Consumption in Synchronous Traction Generators of Diesel Locomotives Under Various Workload Conditions

D. N. Kurilkin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Kurilkin D. N. Determination of Energy Consumption in Synchronous Traction Generators of Diesel Locomotives Under Various Workload Conditions // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 286–297. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-286-297

### Summary

**Purpose:** To develop a methodology for determining energy consumption in synchronous traction generators depending on implemented workload mode. To calculate traction characteristics of a locomotive it is necessary to obtain analytical dependences of energy losses in a synchronous traction generator from rotation frequency of its shaft, electric current and voltage at rectifier plant. To solve the problem of determining significance of various components of losses in a synchronous traction generator under different operating modes. **Methods:** Investigation of all components of energy losses in a traction synchronous generator. Conclusion of analytical dependencies that allow calculating all components of losses in generator depending on its design parameters by obtaining constant coefficients that depend on design parameters of generator. **Results:** The values of capacity spending for energy conversion in a synchronous traction generator are determined. The obtained dependences allow us to perform refined analysis of losses in a traction drive. It is shown that the capacity of mechanical losses at a nominal speed reaches 50 kW, capacity of electrical and magnetic losses can reach 20 kW. **Practical importance:** The results obtained allow us to clarify the amount of energy consumption in a traction drive of locomotives and improve the accuracy of traction calculations. The nature of the change in losses in a synchronous traction generator depending on speed, voltage and current at the output of rectifier plant and its design parameters is shown. The results can be used, among other things to clarify traction characteristics of locomotives.

**Keywords:** Energy efficiency, synchronous traction generator, efficiency of synchronous traction generator, loss components, traction drive.

### References

1. Baranov L. A., Erofeev E. V., Meleshin I. S., Gin' L. M. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov* [Optimization of train traffic control]. Moscow: MIIT Publ., 2011. 164 p. (in Russian)
2. Yurenko K. I., Savos'kin A. N., Fandeev E. I. Matematicheskoe modelirovanie energooptimal'nykh rezhimov vedeniya poezda s uchetom vozmushcheniy [Mathematical modeling of energy-optimal train driving modes taking into account disturbances]. *Izv. vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Izv. universities. North Caucasian region. Technical science]. 2015, I. 3, pp. 34-44. (In Russian)
3. Muginshteyn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. *Energooptimal'nye metody upravleniya dvizheniem poezdov* [Energy-optimal methods of train traffic control]. Moscow: Intekst Publ., 2012. 80 p. (In Russian)
4. Perminov V. A. Vliyanie tekhnicheskogo sostoyaniya vspomogatel'nogo oborudovaniya teplovozov na ikh energoeffektivnost' v ekspluatatsii [Influence of the technical condition of the auxiliary equipment of diesel locomotives on their energy efficiency in operation]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo i konstruktorsko-tekhnologicheskogo instituta podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Research and Design Institute of Rolling Stock]. 2015, I. 97, pp. 45-58. (In Russian)

5. Grishchenko A. V., Kazachenko E. V. *Novye elektricheskie mashiny lokomotivov* [New Electric Machines of Locomotives]. Moscow: GOU «Uchebnogo metodicheskiiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2008. 271 p. (In Russian)
6. Gakkel' E. Ya. *Elektricheskie mashiny i elektrooborudovanie teplovozov* [Electrical machines and electrical equipment of diesel locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1981. 256 p. (In Russian)
7. Katsman M. M. *Raschet i konstruirovaniye elektricheskikh mashin* [Calculation and design of electrical machines]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984. 360 p. (In Russian)
8. Kurilkin D. N. *Opreделение zatrat energii na vzbuzhdeniye sinkhronnogo tyagovogo generatora po dannym mikroprotsessornykh sistem upravleniya dlya prognozirovaniya tyagovoy kharakteristiki lokomotiva* [Determination of energy costs for the excitation of a synchronous traction generator according to microprocessor control systems for predicting the traction characteristics of a locomotive]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, I. 1, pp. 103-117. (In Russian)
9. Marchenko V. S. *Elektrooborudovanie teplovozov* [Electrical equipment of diesel locomotives]. Moscow: IKTs «Akademkniga» Publ., 2003. 248 p. (In Russian)
10. *GOST 21427.3-75. Stal' elektrotekhnicheskaya goryachekatanaya tonkolistovaya* [GOST 21427.3-75. Steel electrical hot-rolled sheet]. (In Russian)
11. *GOST 2582-2013. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskije usloviya* [GOST 2582-2013. Electric rotating traction machines. General specifications]. (In Russian)

Received: April 12, 2022

Accepted: April 28, 2022

**Author's information:**

Dmitry N. KURILKIN – PhD in Engineering;  
kurilkin@pgups.ru