

*Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, А. Г. Брагин*

## УЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ТЕПЛОВОЗА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ

**Аннотация.** На переходные процессы, вызванные изменением режима работы, приходится значительная доля времени работы дизель-генераторной установки тепловоза. При этом в тяговых расчетах принимается мгновенное изменение мощности и расхода топлива силовой установкой в момент перевода рукоятки контроллера, что может приводить к снижению их точности. На основании статистического и регрессионного анализа данных регистрации подсистемы бортовой диагностики тепловозов 2ТЭ116У в работе предложена и обоснована методика учета влияния переходных процессов на уровень мощности силовой установки и расход топлива. Полученные результаты позволяют уточнить параметры тяговой характеристики локомотива и могут использоваться при выполнении оперативных тяговых расчетов.

**Ключевые слова:** переходные процессы, расход топлива, дизель-генераторная установка, снижение мощности, тепловоз.

**Для цитирования:** Курилкин, Д. Н. Учет переходных процессов в дизель-генераторной установке тепловоза при выполнении тяговых расчетов / Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, А. Г. Брагин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 22–34. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_1\_22.

### *Постановка задачи*

Одним из вопросов, периодически возникающих как при эксплуатации, так и при проектировании тепловозов, является вопрос о влиянии переходных режимов работы силовой установки на тягово-энергетические свойства локомотива. Большинство специалистов в качестве единственного результата такого влияния традиционно рассматривают увеличение эксплуатационного расхода топлива, для оценки которого предлагаются различные методики [1–5]. При этом вопрос о влиянии переходных процессов (ПП) на уровень тяговой характеристики не ставится. При выполнении тяговых расчетов переходные процессы, вызванные изменением позиции контроллера, как правило, не учитывают, принимая допущение о том, что частота вращения коленчатого вала и мощность дизель-генератора изменяются мгновенно [6–8], а увеличение расхода топлива, вызванное переходными процессами, учитывается введением корректирующих коэффициентов [9, 10].

Целью данной работы является разработка методики учета влияния ПП на тяговые свойства локомотива и расход топлива в эксплуатации при выполнении тяговых расчетов.

### *Учет влияния переходных процессов на уровень мощности силовой установки тепловоза*

Как показано в [1–5], на переходные процессы приходится значительная (от 8 до 58 %) доля времени работы дизель-генераторной установки тепловоза (ДГУ) в эксплуатации. В форсированных дизелях темп увеличения частоты вращения коленчатого вала дизеля при увеличении позиции контроллера, как правило, превышает темп увеличения мощности тягового генератора (рис. 1), что приводит к снижению средней мощности ДГУ, уменьшению механического КПД дизеля и увеличению удельного эффективного расхода топлива дизелем при одновременном снижении его абсолютного расхода. На рис. 1 представлен процесс увеличения мощности тягового генератора (ТГ)  $P_{ТГ}$ , частоты вращения коленчатого вала  $n_{диз}$  и положения реек топливных насосов высокого давления (ТНВД) дизеля ДГУ 18-9ДГ тепловоза 2ТЭ116У при переводе рукоятки задатчика позиций с 9-й позиции (ПКМ=9) на 11-ю (ПКМ=11). На рис. 2 приведено изменение значений тех же параметров ДГУ при переводе рукоятки задатчика с 13-й на 11-ю позицию.

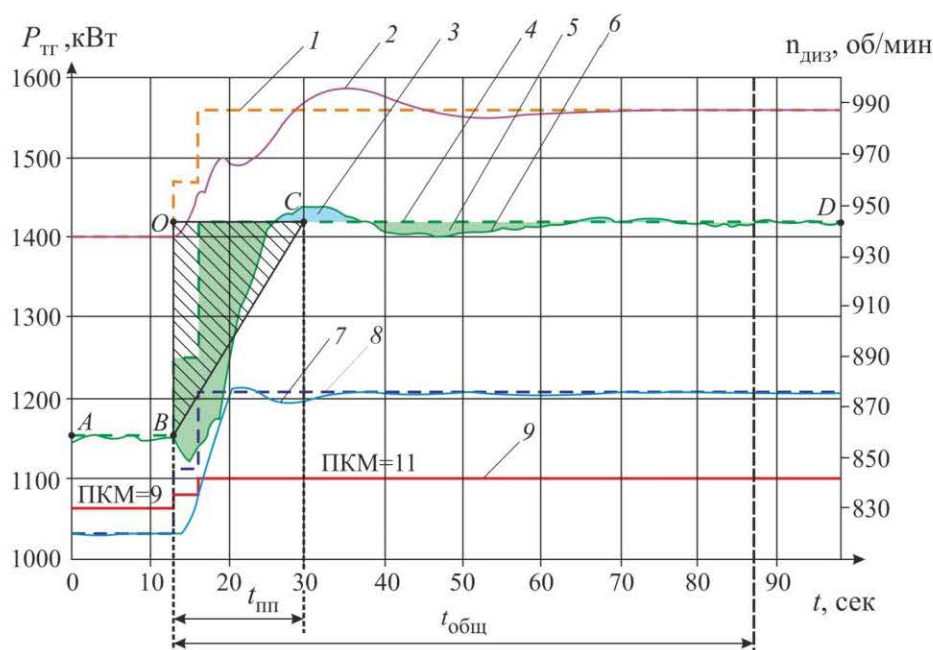


Рис. 1. Изменение параметров ДГУ тепловоза 2ТЭ116У при увеличении позиции контроллера машиниста:

1 – положение реек ТНВД при установленном режиме работы; 2 – фактическое положение реек ТНВД; 3 – область, в которой фактическая мощность ТГ больше установленной; 4 – установленное значение мощности ТГ; 5 – область, в которой фактическая мощность ТГ меньше установленной; 6 – фактическое значение мощности тягового генератора; 7 – фактическая частота вращения вала дизеля; 8 – установленная частота вращения вала дизеля; 9 – изменение позиций контроллера машиниста; ABCD – расчетная характеристика изменения мощности дизеля

Как отмечено выше, в практике тяговых расчетов переходные процессы при изменении позиции контроллера, как правило, не учитывают, принимая допущение о ступенчатом изменении мощности ДГУ [6–8] (линия ABCD на рис. 1 и 2). Между тем характер фактического изменения мощности тягового генератора (линия 6 на рис. 1 и 2) существенно отличается от линии ABCD. Учет плавного изменения мощности силовой установки тепловоза при изменении позиции контроллера повышает точность определения силы тяги и моментов переключения позиций при выполнении тяговых расчетов [11, 12]. Для этого целесообразно реальную диаграмму изменения мощности дизель-генераторной установки (линия 6 на рис. 1 и 2) заменить расчетной линейной, образующей ломаную линию ABCD. При этом работа ДГУ при изменении мощности по расчетной характеристике должна соответствовать работе при изменении мощности по реальной характеристике, т. е. должно выполняться условие:

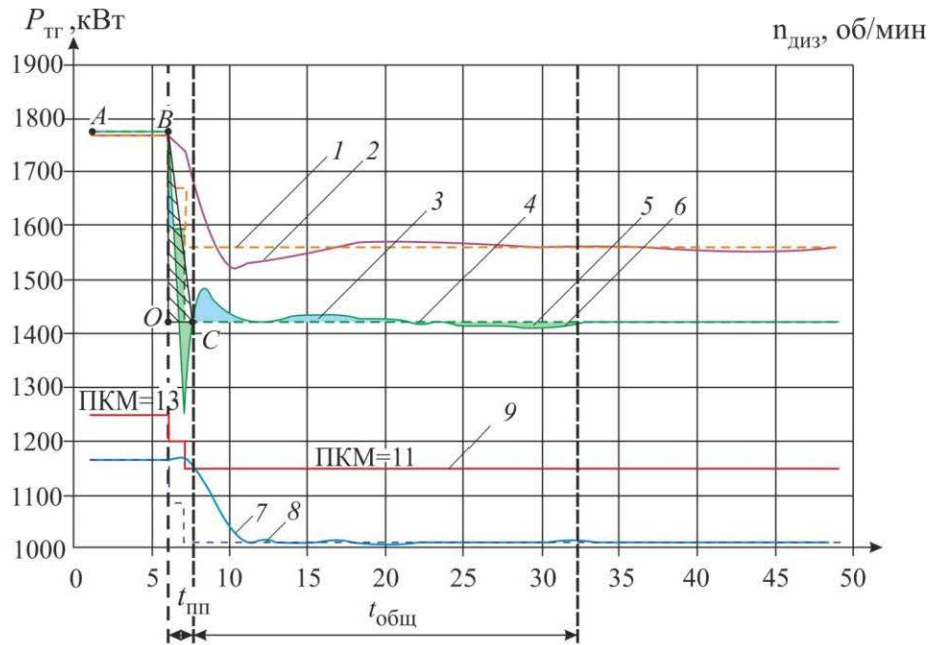
$$\sum_{i=1}^n P_{\text{ТГ} ABCDi} \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^n P_{\text{ТГ} \phi i} \cdot \Delta t_i, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ТГ} \phi i}$  – фактическое мгновенное значение мощности тягового генератора;

$P_{\text{ТГ} ABCDi}$  – мгновенное значение мощности тягового генератора по линии ABCD;

$n, \Delta t_i$  – число измерений и шаг между двумя измерениями фактической мощности тягового генератора во время переходного процесса, связанные с общим временем переходного процесса зависимо-

стью  $t_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ .



**Рис. 2. Изменение параметров ДГУ тепловоза 2ТЭ116У при уменьшении позиции контроллера машиниста:**

1 – положение реек ТНВД при установившемся режиме работы; 2 – фактическое положение реек ТНВД; 3 – область, в которой фактическая мощность ТГ больше установившейся; 4 – установившееся значение мощности ТГ; 5 – область, в которой фактическая мощность ТГ меньше установившейся; 6 – фактическое значение мощности тягового генератора; 7 – фактическая частота вращения вала дизеля; 8 – установившаяся частота вращения вала дизеля; 9 – изменение позиций контроллера машиниста; ABCD – расчетная характеристика изменения мощности дизеля

Введем понятие расчетного времени переходного процесса  $t_{\text{пер}}$  (см. рис. 1 и 2), в течение которого происходит нарастание мощности ДГУ по расчетной траектории. Учитывая линейный характер изменения расчетной мощности ТГ в течение  $t_{\text{пер}}$ , условие (1) может быть представлено в виде:

$$\frac{1}{2} \cdot t_{\text{пер}} \cdot (P_{\text{ТГ}}^{\text{к}} + P_{\text{ТГ}}^{\text{н}}) + (t_{\text{общ}} - t_{\text{пер}}) \cdot P_{\text{ТГ}}^{\text{к}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{ТГ}\phi_i} \cdot \Delta t_i, \quad (2)$$

где  $P_{\text{ТГ}}^{\text{к}}$  и  $P_{\text{ТГ}}^{\text{н}}$  – установившиеся значения мощности тягового генератора на конечной и начальной позиции контроллера.

За начало переходного процесса принимается момент изменения позиции контроллера машиниста. Моменту завершения переходного процесса и переходу в установившийся режим работы соответствует одновременное выполнение следующих условий:

$$\begin{aligned} \left| \frac{n_{\text{диз}} - n_{\text{диз}}^{\text{уст}}}{n_{\text{диз}}^{\text{уст}}} \right| &< 0,01; \\ \left| \frac{h_{\text{р}} - h_{\text{р}}^{\text{уст}}}{h_{\text{р}}^{\text{уст}}} \right| &< 0,01; \\ \left| \frac{P_{\text{ТГ}} - P_{\text{ТГ}}^{\text{уст}}}{P_{\text{ТГ}}^{\text{уст}}} \right| &< 0,05, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $n_{\text{диз}}$ ,  $h_{\text{р}}$ ,  $P_{\text{ТГ}}$  – текущие значения частоты вращения ДГУ, выхода реек топливных насосов и мощность тягового генератора, об/мин, ед. кода, кВт;

$n_{\text{диз}}^{\text{уст}}$ ,  $h_{\text{р}}^{\text{уст}}$ ,  $P_{\text{ТГ}}^{\text{уст}}$  – установившиеся значения частоты вращения ДГУ, выхода реек топливных насосов и мощность тягового генератора, об/мин, ед. кода, кВт.

Выполнив элементарные преобразования выражения (2), получим время расчетного переходного процесса (отрезок  $OC$  на рис. 1 и 2):

$$t_{mn} = 2 \cdot \frac{P_{\pi}^k \cdot t_{\text{общ}} - \sum_{i=1}^n P_{\pi\phi i} \cdot \Delta t_i}{P_{\pi}^k - P_{\pi}^n}. \quad (4)$$

В этом случае расчетная мощность тягового генератора при увеличении позиции контроллера  $P_{\pi}$  ( $n \rightarrow k$ ) в любой момент времени  $t$  от начала переходного процесса может быть определена следующим образом:

$$P_{\pi}(n \rightarrow k) = \begin{cases} P_{\pi}^n + \frac{P_{\pi}^k - P_{\pi}^n}{t_{mn}} \cdot t, & \text{при } t \leq t_{mn} \\ P_{\pi}^k, & \text{при } t > t_{mn} \end{cases}. \quad (5)$$

Для определения фактических значений расчетного времени переходного процесса  $t_{mn}$  были проанализированы данные подсистемы бортовой диагностики четырех сдй тепловозов 2ТЭ116У, находящихся в рядовой эксплуатации на Октябрьской железной дороге.

В качестве установившихся значений основных параметров ДГУ принимались средние значения, удовлетворяющие условиям (3), рассчитанные для каждой позиции контроллера машиниста. В итоге было обработано 90 фрагментов данных, соответствующих различным вариантам изменения позиций контроллера. С учетом того, что время переходных процессов при наборе позиций существенно превышает время переходных процессов при сбросе, набор и сброс позиций рассматривались отдельно.

С учетом большого числа различных факторов, влияющих на время переходного процесса  $t_{mn}$ , можно предположить, что его значение является нормально распределенной случайной величиной, что позволяет использовать в расчете его математическое ожидание с обязательной проверкой гипотезы о нормальном законе распределения. Проверка осуществляется с использованием метода Е. И. Пустыльника [13], согласно которому условием соответствия выборки нормальному закону распределения является выполнение условий:

$$|A_{t_{mn}}| \leq 3 \cdot \sqrt{D(A_{t_{mn}})}; \quad (6)$$

$$|E_{t_{mn}}| \leq 5 \cdot \sqrt{D(E_{t_{mn}})}, \quad (7)$$

где  $A_{t_{mn}}$  и  $E_{t_{mn}}$  – асимметрия и эксцесс выборки времени переходного процесса в расчете на одну позицию контроллера;

$D(A_{t_{mn}})$  и  $D(E_{t_{mn}})$  – дисперсия асимметрии и эксцесса выборки.

Указанные параметры определяются по следующим известным зависимостям [13]:

$$A_{t_{mn}} = \frac{1}{n \cdot S_{t_{mn}}^3} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{mni} - \bar{t}_{mn})^3; \quad (8)$$

$$E_{t_{mn}} = \frac{1}{n \cdot S_{t_{mn}}^4} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{mni} - \bar{t}_{mn})^4 - 3; \quad (9)$$

$$D(A_{t_{mn}}) = \frac{6 \cdot (n-1)}{(n+1) \cdot (n+3)}; \quad (10)$$

$$D(E_{t_{mn}}) = \frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n+1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)}, \quad (11)$$

где  $i$  – номер фрагмента данных с ПП;

$n$  – число;

$t_{mni}$  – время переходного процесса в расчете на одну позицию, с;

$\bar{t}_{mn}$  – математическое ожидание времени переходного процесса, с;

$S_{t_{\text{пр}}}$  – среднее квадратичное отклонение времени переходного процесса

Математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение времени переходного процесса, определяются по формулам:

$$\bar{t}_{\text{пр}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_{\text{пр}i}; \quad (12)$$

$$S_{t_{\text{пр}}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{\text{пр}i} - \bar{t}_{\text{пр}})^2}. \quad (13)$$

Группированные статистические ряды значений  $t_{\text{пр}}$  в расчете на одну позицию контроллера при увеличении и уменьшении позиций представлены на рис. 3 и 4. Результаты вычислений статистических характеристик выборок приведены в табл. 1.

Как следует из приведенных результатов, гипотеза о нормальном законе распределения времени переходного процесса подтверждается как для набора, так и для сброса позиций.

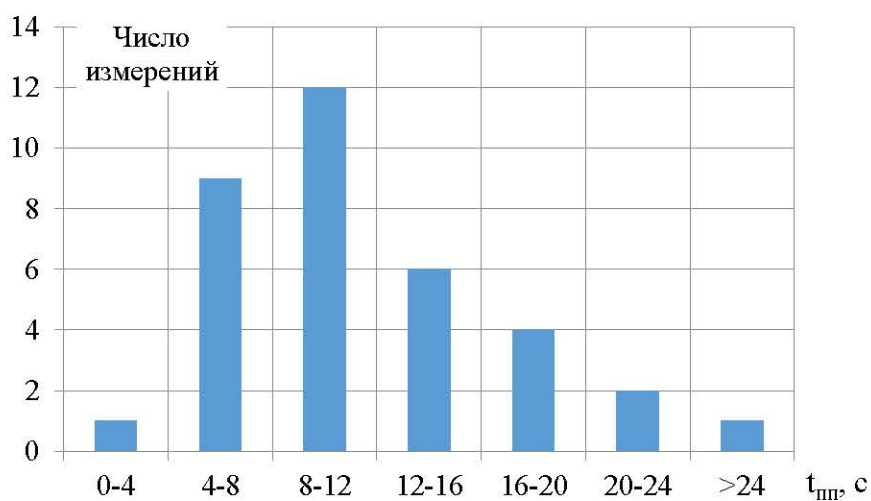


Рис. 3. Группированный статистический ряд времени переходного процесса при наборе одной позиции контроллера

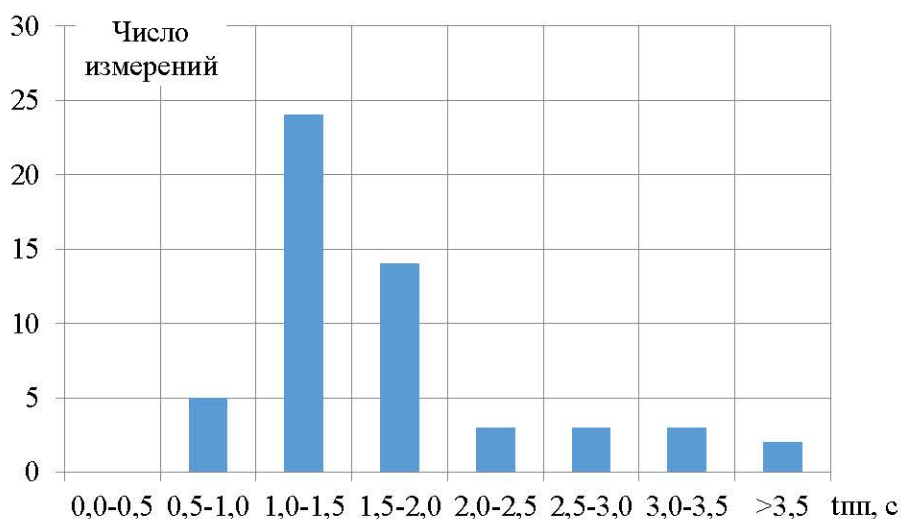


Рис. 4. Группированный статистический ряд времени переходного процесса при сбросе одной позиции контроллера

Таблица 1

## Результаты определения времени переходного процесса

Параметр	Значение параметра	
	Увеличение позиций	Уменьшение позиций
Число измерений, $n$	35	55
Математическое ожидание $\overline{t_{mn}}$ , с	11,3	1,7
Среднеквадратичное отклонение $S_{t_{mn}}$ , с	4,9	0,7
Асимметрия выборки $A_{t_{mn}}$	0,72	0,84
Экцесс выборки $E_{t_{mn}}$	0,35	0,79
Дисперсия асимметрии выборки $D(A_{t_{mn}})$	0,15	0,099
Дисперсия эксцесса выборки $D(E_{t_{mn}})$	0,45	0,333
Допустимая асимметрия выборки $A_{t_{mn}}$	1,15	0,94
Допустимый эксцесс выборки $E_{t_{mn}}$	3,35	2,88

**Учет влияния переходных процессов на эксплуатационный расход топлива**

Как показано выше, опережающее изменение частоты вращения коленчатого вала в переходных режимах работы, вызванных изменением позиции контроллера, приводит к уменьшению механического коэффициента полезного действия и увеличению удельного эффективного расхода топлива дизеля с одновременным уменьшением работы ДГУ при наборе и некоторым ее увеличением при сбросе позиции.

В качестве критерия для оценки изменения эффективности силовой установки в переходном процессе может использоваться величина коэффициента  $K_{mn}$ :

$$K_{mn} = \frac{g_{\pi}^{mj}}{g_{\pi}^{mj}}, \quad (14)$$

где  $g_{\pi}^{mj}$ ,  $g_{\pi}^{mj}$  – удельный расход топлива на кВт·ч работы ДГУ на  $j$ -й позиции контроллера в установленном режиме работы и средний удельный расход топлива на кВт·ч генератора в реальном переходном процессе длительностью  $t_{обм}$  при наборе  $j$ -й позиции (кг/кВт·ч).

Величина  $g_{\pi}^{mj}$  удельного расхода топлива на кВт·ч работы генератора в установленном режиме работы связана с удельным эффективным расходом топлива дизеля  $g_e^{mj}$  на  $j$ -й позиции контроллера выражением:

$$g_{\pi}^{mj} = g_e^{mj} \cdot \frac{N_e^j}{P_{\pi}^j}, \quad (15)$$

где  $N_e^j$  – эффективная мощность дизеля в установленном режиме работы на  $j$ -й позиции контроллера, кВт;

$P_{\pi}^j = \sum_{i=1}^6 (U_i^j \cdot I_i^j)$  – мощность на зажимах выпрямительной установки в установленном режиме

работы на  $j$ -й позиции контроллера, кВт;

$i$  – номер тягового двигателя;

$U_i^j$  – напряжение, прикладываемое к  $i$ -му тяговому двигателю на  $j$ -й позиции;

$I_i^j$  – ток, протекающий через якорь  $i$ -го тягового двигателя на  $j$ -й позиции.

Эффективная мощность дизеля  $N_e$  на  $j$ -й позиции:

$$N_e^j = P_{\pi}^j + \Delta P_{\Gamma}^j + \Delta P_{\text{вы}}^j + P_{\text{вт}}^j + P_{\text{вс}}^j + P_{\text{эдк}}^j + P_{\text{ао}}^j + P_{\text{мвх ср}}^j + P_{\text{неоткл}}^j, \quad (16)$$

где  $P_{\pi}^j$  – мощность на выходе тяговой выпрямительной установки;

$\Delta P_{\Gamma}^j$  – мощность потерь энергии в СТГ без учета затрат на возбуждение;

$\Delta P_{\text{вы}}^j$  – мощность потерь в выпрямительной установке;

$P_{\text{вт}}^j$  – мощность, затрачиваемая на возбуждение СТГ;

$P_{\text{всв}}^j$  – мощность, затрачиваемая на возбуждение синхронного возбудителя;

$P_{\text{эдк}}^j$  – мощность, затрачиваемая на привод тормозного компрессора;

$P_{\text{аб}}^j$  – мощность, затрачиваемая на подзарядку аккумуляторной батареи;

$P_{\text{мвх ср}}^j$  – мощность, затрачиваемая на привод вентиляторов охлаждения теплоносителей дизеля;

$P_{\text{неоткл}}^j$  – мощность, затрачиваемая на привод неотключаемых нагрузок.

Методика определения составляющих правой части выражения (16) изложена в работах [14–19].

Величина удельного эффективного расхода топлива  $g_{\text{тр}}^{\text{нд}j}$  в установившихся режимах работы ДГУ для каждой позиции контроллера машиниста может быть определена из универсальной характеристики дизеля по методике [20], согласно которой изменение  $g_{\text{тр}}^{\text{нд}j}$  по нагрузочной характеристике, соответствующей  $j$ -й позиции контроллера, может быть аппроксимировано полиномом вида:

$$g_e^j = a_j \cdot N_e^4 + b_j \cdot N_e^3 + c_j \cdot N_e^2 + d_j \cdot N_e + e_j, \quad (17)$$

где  $a_j, b_j, c_j, d_j, e_j$  – постоянные коэффициенты, определяемые для каждой  $j$ -й позиции контроллера (частоты вращения коленчатого вала дизеля) [20].

Средний удельный расход топлива на кВтч генератора в реальном переходном процессе длительностью  $t_{\text{общ}}$  при наборе или  $j$ -й позиции может быть определен следующим образом:

$$g_{\text{тр}}^{\text{мп}j} = \frac{G_{\text{мп}}^j}{\sum_{i=1}^n P_{\text{тф}i} \cdot \Delta t_i}, \quad (18)$$

где  $G_{\text{мп}}^j$  – расход топлива за время перехода на  $j$ -ю позицию контроллера.

Реальный расход топлива за время переходного процесса  $G_{\text{мп}}^j$  может быть определен с использованием параметров ДГУ, регистрируемых подсистемой диагностики системы управления МСУ-ТП тепловоза 2ТЭ116У [4]:

$$G_{\text{мп}}^j = \frac{1}{30} \cdot k_h \cdot \sum_{i=1}^n (n_{\text{диз}i} \cdot h_{\text{р}i}^{\text{мп}} \cdot \Delta t_i), \quad (19)$$

где  $k_h$  – коэффициент пропорциональности, связывающий цикловую подачу топлива с приведенным кодом рейки ТНВД, кг/ц·ед.;

$n_{\text{диз}i}$  – текущее значение частоты вращения ДГУ, об/мин.

$h_{\text{р}i}^{\text{мп}}$  – приведенный код рейки ТНВД, ед., определяемый по зависимости [4]:

$$h_{\text{р}i}^{\text{мп}} = h_{\text{р}i} - h_0, \quad (20)$$

где  $h_{\text{р}i}$  – текущее значение кода рейки ТНВД, ед.;

$h_0$  – код рейки ТНВД при остановленном дизеле, ед.

Величина коэффициента  $k_h$  определяется действием многих факторов, основными из которых являются настройка рычажной передачи регулятора дизеля, частота вращения коленчатого вала (средняя скорость плунжера ТНВД), температура и давление топлива в коллекторе низкого давления [21].

При установившемся режиме работы ДГУ  $k_h^{\text{н(к)}}$  может быть определен по следующей зависимости:

$$k_h^{\text{н(к)}} = \frac{B_{\text{ч}}^{\text{н(к)}}}{h_{\text{р}}^{\text{н(к)}} \cdot n_{\text{диз}}^{\text{н(к)}}}, \quad (21)$$

где  $B_{\text{ч}}^{\text{н(к)}}$  – часовой расход топлива при работе ДГУ в установившемся режиме на начальной (конечной) позиции, кг/ч;

$n_{\text{диз}}^{\text{н(к)}}$  – частота вращения вала дизеля на начальной (конечной) позиции контроллера, об/мин;

$h_p^{\text{прн}(k)}$  и  $h_p^{\text{пр}j}$  – приведенный код рейки ТНВД на начальной (конечной) позиции контроллера, ед.

Тогда во время переходного процесса (см. рис. 1 и 2) коэффициент  $k_h^{\text{пр}}$  может быть определен из соотношения:

$$k_h^{\text{пр}} = \begin{cases} 0,5 \cdot (k_h^{\text{н}} + k_h^{\text{к}}), & \text{при } t \leq t_{\text{пр}} \\ k_h^{\text{к}}, & \text{при } t_{\text{общ}} \geq t > t_{\text{пр}} \end{cases} \quad (22)$$

Среднее за анализируемое время переходного процесса значение  $k_h^{\text{пр}}$ :

$$k_h^{\text{пр}} = \frac{t_{\text{пр}}}{t_{\text{общ}}} \cdot 0,5 \cdot (k_h^{\text{н}} + k_h^{\text{к}}) + \frac{t_{\text{общ}} - t_{\text{пр}}}{t_{\text{общ}}} \cdot k_h^{\text{к}} = \frac{0,5 \cdot t_{\text{пр}}}{t_{\text{общ}}} k_h^{\text{н}} + \frac{t_{\text{общ}} - 0,5 \cdot t_{\text{пр}}}{t_{\text{общ}}} k_h^{\text{к}} \quad (23)$$

С учетом (21):

$$k_h^{\text{пр}} = \frac{0,5 \cdot t_{\text{пр}}}{t_{\text{общ}}} \cdot \frac{B_{\text{ч}}^{\text{н}}}{h_p^{\text{прн}} \cdot n_{\text{диз}}^{\text{н}}} + \frac{t_{\text{общ}} - 0,5 \cdot t_{\text{пр}}}{t_{\text{общ}}} \cdot \frac{B_{\text{ч}}^{\text{к}}}{h_p^{\text{прк}} \cdot n_{\text{диз}}^{\text{к}}} \quad (24)$$

При расчете значения коэффициента  $K_{\text{пр}}$  использовались те же фрагменты данных, что и при определении времени переходного процесса  $t_{\text{пр}}$ .

На рис. 5 и 6 представлены группированные статистические ряды значений  $K_{\text{пр}}$  при увеличении и уменьшении позиций контроллера.

В табл. 2 приведены результаты вычисления статистических параметров коэффициента  $K_{\text{пр}}$  при наборе и сбросе позиций, подтверждающие нормальный закон распределения его значений.

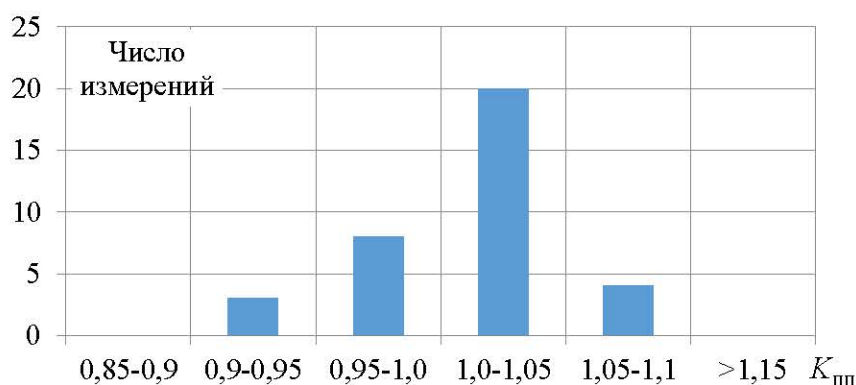


Рис. 5. Группированный статистический ряд коэффициента  $K_{\text{пр}}$  при увеличении позиций контроллера

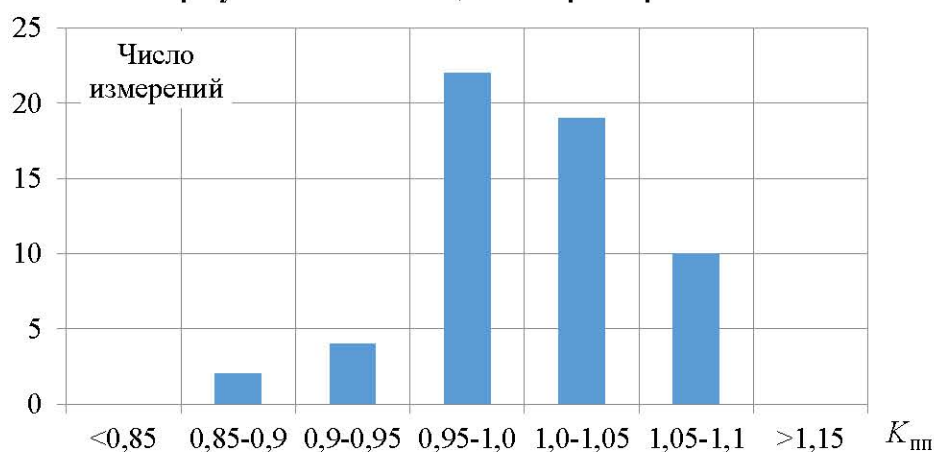


Рис. 6. Группированный статистический ряд коэффициента  $K_{\text{пр}}$  при уменьшении позиций контроллера

Таблица 2

Результаты определения коэффициента  $K_{\text{пп}}$ 

Параметр	Значение параметра	
	Увеличение позиций	Уменьшение позиций
Число измерений, $n$	35	55
Математическое ожидание $\overline{K_{\text{пп}}}$	1,007	1,005
Среднеквадратичное отклонение $S_{K_{\text{пп}}}$	0,033	0,049
Асимметрия выборки $A_{K_{\text{пп}}}$	-0,65	-0,261
Экссес выборки $E_{K_{\text{пп}}}$	0,36	0,439
Дисперсия асимметрии выборки $D(A_{K_{\text{пп}}})$	0,15	0,099
Дисперсия эксцесса выборки $D(E_{K_{\text{пп}}})$	0,45	0,333
Допустимая асимметрия выборки $A_{K_{\text{пп}}}$	1,15	0,94
Допустимый эксцес выборки $E_{K_{\text{пп}}}$	3,35	2,88

**Обсуждение результатов**

В форсированных дизелях следствием опережающего темпа увеличения частоты вращения коленчатого вала при одновременном ограничении перерегулирования по подаче топлива является уменьшение темпа набора мощности тягового генератора при увеличении позиции контроллера. Для тепловоза серии 2ТЭ116У среднее время от изменения позиции контроллера (положения рукоятки задатчика позиции) до выхода ДГУ на мощность, соответствующую установленной позиции, составляет 11,3 с на одну позицию. При уменьшении позиции, напротив, имеет место запаздывание темпа снижения частоты вращения коленчатого вала по отношению к интенсивности изменения мощности тягового генератора во избежание перехода нагнетателя турбокомпрессора в режим помпажа. Среднее время снижения мощности до уровня, соответствующего установленной позиции, составляет 1,7 с на одну позицию.

Эти особенности организации переходных процессов приводят к уменьшению средней мощности силовой установки и уровня тяговой характеристики тепловоза в период переходного процесса. Принимая во внимание значительную долю времени работы тепловоза, приходящуюся на такие процессы, учет реального темпа изменения мощности ДГУ при изменении позиций контроллера машиниста в тяговых расчетах с использованием зависимости (5) позволит повысить их точность, особенно в части определения моментов переключения позиций.

Как следует из рис. 5, 6 и табл. 2, математическое ожидание величины коэффициента  $K_{\text{пп}}$  (14) составляет 1,007 для увеличения и 1,005 для уменьшения позиций контроллера. Следовательно, увеличение удельного расхода топлива на кВтч работы ДГУ в переходном процессе в среднем не превышает 0,7 % при одновременном уменьшении работы ДГУ, выполненной за время переходного процесса. Соответственно, перерасход топлива за время работы силовой установки только в неустановившихся режимах работы сопоставим (без учета расхода в установившихся режимах и режимах холостого хода) с погрешностью измерения количества топлива в баке (0,65 %) [4] и практически никак не влияет на расход топлива за поездку.

Таким образом, широко распространенное мнение о существенном влиянии переходных процессов в ДГУ тепловоза на эксплуатационный расход топлива не находит подтверждения. Аналогичные результаты получены в работе [5]. В работах [3, 4] на основе обработки результатов работы маневровых тепловозов делается вывод об отсутствии связи между среднеэксплуатационным удельным расходом топлива на единицу работы ДГУ и числом переключений позиций контроллера, что подтверждает отсутствие влияния переходных процессов в силовой установке на эксплуатационный расход топлива тепловозом.

При выполнении тяговых расчетов значение мгновенного часового расхода топлива в произвольный момент времени  $t$  от начала переходного процесса может вычисляться по формуле:

$$B_{\text{ч}}(н \rightarrow к) = \begin{cases} B_{\text{ч}}^н + \frac{B_{\text{ч}}^к - B_{\text{ч}}^н}{t_{\text{пп}}} \cdot t, & \text{при } t \leq t_{\text{пп}} \\ B_{\text{ч}}^к, & \text{при } t > t_{\text{пп}} \end{cases} \quad (25)$$

### Выводы

1 В работе предложена методика учета влияния переходных процессов в силовой установке автономного локомотива на его тяговые свойства и расход топлива.

2 Время изменения мощности силовой установки тепловоза в переходном процессе является случайной величиной с нормальным законом распределения и математическим ожиданием (для силовой установки тепловоза серии 2ТЭ116У) 11,3 с на одну позицию при увеличении позиций и 1,7 с на позицию при уменьшении.

3 Предложена зависимость для определения значения мощности на зажимах выпрямительной установки тепловоза в течение переходного процесса.

4 Увеличение удельного эффективного расхода топлива дизелем в период переходного процесса (без учета установившихся режимов работы ДГУ и режимов холостого хода) не превышает 0,7 % и никак не влияет на расход топлива за поездку.

5 Предложена зависимость для определения мгновенного часового расхода топлива в каждый момент времени переходного процесса.

### Список литературы

1 Володин, А. И. Топливная экономичность силовых установок тепловозов / А. И. Володин, Г. А. Фофанов. – Москва : Транспорт, 1979. – 126 с.

2 Хомич, А. З. Топливная эффективность и вспомогательные режимы тепловозных дизелей / А. З. Хомич. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1987. – 271 с.

3 Попов, К. М. Некоторые вопросы практического использования бортовых систем учета топлива тепловозов / К. М. Попов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2022. – Т. 81, № 4. – С. 370–382. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-4-370-382.

4 Влияние переходных процессов в силовой установке маневрового тепловоза на расход топлива в эксплуатации / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский, Д. Н. Курилкин // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 1. – С. 48–67. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-48-67.

5 Влияние переходных процессов дизель-генераторной установки тепловоза серии 2ТЭ116У на его эксплуатационные показатели / В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин, С. И. Ким, С. В. Сергеев // Локомотивы. XXI век : сборник материалов Международной научно-технической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения д.т.н., профессора Е. Я. Гаккель. – Санкт-Петербург : ПГУПС. – 2013. – С. 146–147.

6 Климович, А. В. Оптимизация управления движением поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу : монография / А. В. Климович. – Москва : Компания Спутник, 2008. – 263 с. – ISBN 978-5-364-01071-1.

7 Мугинштейн, Л. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поезда / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко // Вестник

### References

1 Volodin, A. I. Fuel efficiency of diesel locomotive power plants / A. I. Volodin, G. A. Fofanov. – Moscow : Transport, 1979. – 126 p.

2 Khomich, A. Z. Fuel efficiency and auxiliary modes of diesel locomotives / A. Z. Khomich. – 2nd ed. and additional. – Moscow : Transport, 1987. – 271 p.

3 Popov, K. M. Some issues of practical use of on-board fuel metering systems for diesel locomotives / K. M. Popov // Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport (Bulletin of VNIIZHT). – 2022. – Vol. 81, No.4. – P. 370–382. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-4-370-382.

4 The influence of transients in the power plant of a shunting locomotive on fuel consumption in operation / V. V. Grachev, A. V. Grishchenko, F. Yu. Bazilevsky, D. N. Kurilkin // Bulletin of the results of scientific research. – 2022. – No. 1. – P. 48–67. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-48-67.

5 The influence of transients of the diesel generator set of the 2TE116U series locomotive on its performance / V. V. Grachev, D. N. Kurilkin, S. I. Kim, S. V. Sergeev // Locomotives. XXI century : In the collection of materials of the International Scientific and Technical Conference, dedicated to the 110th anniversary of the birth of Doctor of Technical Sciences, Professor E. Ya. Gakkel. – Saint Petersburg : PGUPS. – 2013. – P. 146–147.

6 Klimovich, A. V. Optimization of train traffic control to minimize energy costs for traction : monograph / A. V. Klimovich. – Moscow : Sputnik Company, 2008. – 263 p. – ISBN 978-5-364-01071-1.

7 Muginstein, L. A. Energy-optimal traction calculation of train movement / L. A. Muginstein,

ВНИИЖТ. – 2013. – № 6. – С. 3–13. – ISSN 2223-9731.

8 Баранов, Л. А. Энергооптимальное управление движением транспортных средств / Л. А. Баранов, Н. А. Кузнецов, М. В. Максимов // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 12–18. – ISSN 0013-5860.

9 Ерофеев, Е. В. Расчет оптимальных программ автоведения поезда при ступенчатом управлении силой тяги / Е. В. Ерофеев, И. С. Мостов // Вопросы автоматизации процессов управления движением поездов : сборник трудов под ред. Л. А. Баранова. – Москва : МИИТ, 1975. – Вып. 492. – С. 16–21.

10 Ерофеев, Е. В. Оптимизация программ систем автоведения поездов / Е. В. Ерофеев // Автоматическое и телемеханическое управление движением поездов : сборник трудов под ред. Л. А. Баранова. – Москва : МИИТ, 1980. – Вып. 661. – С. 41–50.

11 Гриневич, В. П. Использование программного комплекса «Тяга-прогноз» для поиска энергооптимальных режимов ведения поезда / В. П. Гриневич, Д. Н. Курилкин, Т. С. Авсиевич // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 4. – С. 131–149. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-4-131-149.

12 Курилкин, Д. Н. Совершенствование правил тяговых расчетов / Д. Н. Курилкин, В. П. Гриневич // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 2. – С. 39–43. – ISSN 0044-4448.

13 Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. – Москва : Наука, 1968. – 288 с.

14 Курилкин, Д. Н. Определение параметров тягово-энергетических характеристик автономных локомотивов по данным микропроцессорных систем управления и диагностики : монография / Д. Н. Курилкин. – Санкт-Петербург : ПГУПС. – 2022. – 160 с. – ISBN 978-5-6049080-0-6.

15 Курилкин, Д. Н. Определение затрат энергии на возбуждение тягового генератора по данным микропроцессорных систем управления для прогнозирования тяговой характеристики локомотива / Д. Н. Курилкин // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 1. – С. 103–117. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-103-117.

16 Курилкин, Д. Н. Анализ затрат энергии на привод мотор-вентиляторов охлаждающего устройства дизеля тепловоза 2ТЭ116У по данным МСУ-ТП / Д. Н. Курилкин // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 1 (91). – С. 25–33. – ISSN 1997-0722.

A. E. Ilyutovich, I. A. Yabko // Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport (Bulletin of VNIIZHT). – 2013. – No. 6. – P. 3–13. – ISSN 2223-9731.

8 Baranov, L. A. Energooptimal control of vehicle movement / L. A. Baranov, N. A. Kuznetsov, M. V. Maksimov // Elektrotechnika. – 2016. – No. 9. – P. 12–18. – ISSN 0013-5860.

9 Yerofeev, E. V. Calculation of optimal programs of train driving with stepwise traction control / E. V. Yerofeev, I. S. Mostov // Issues of automation of train traffic control processes : In the collection of works edited by L. A. Baranov. – Moscow : MIIT, 1975. – Issue. 492. – P. 16–21.

10 Yerofeyev, E. V. Optimization of programs for train driving systems / E. V. Yerofeyev // Automatic and telemechanical control of train traffic : In the collection of works edited by L. A. Baranov. – Moscow : MIIT, 1980. – Issue 661. – P. 41–50.

11 Grinevich, V. P. The use of the software complex "Traction-forecast" for the search for energy-optimal train driving modes / V. P. Grinevich, D. N. Kurilkin, T. S. Avsievich // Bulletin of the results of scientific research. – 2022. – No. 4. – P. 131–149. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-4-131-149.

12 Kurilkin, D. N. Improvement of the rules of traction calculations / D. N. Kurilkin, V. P. Grinevich // Railway transport. – 2023. – No. 2. – P. 39–43. – ISSN 0044-4448.

13 Pustyl'nik, E. I. Statistical methods of analysis and processing of observations / E. I. Pustyl'nik. – Moscow : Nauka, 1968. – 288 p.

14 Kurilkin, D. N. Determination of the parameters of traction and energy characteristics of autonomous locomotives according to microprocessor control and diagnostic systems: monograph / D. N. Kurilkin. – Saint Petersburg : PGUPS. – 2022. – 160 p. – ISBN 978-5-6049080-0-6.

15 Kurilkin, D. N. Determination of energy costs for excitation of a traction generator according to microprocessor control systems for predicting the traction characteristics of a locomotive / D. N. Kurilkin // Bulletin of scientific research results. – 2022. – No. 1. – P. 103–117. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-103-117.

16 Kurilkin, D. N. Analysis of energy costs for the drive of motor fans of the cooling device of the diesel locomotive 2TE116U according to MSU-TP / D. N. Kurilkin // Bulletin of transport of the Volga region. – 2022 – No. 1 (91). – P. 25–33. – ISSN 1997-0722.

17 Курилкин, Д. Н. Определение затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза по данным микропроцессорной системы управления / Д. Н. Курилкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 68–74. – DOI 10.20295/1815-588x-2022-19-1-68-74.

18 Курилкин, Д. Н. Определение затрат энергии в синхронных тяговых генераторах тепловозов при различных режимах нагружения / Д. Н. Курилкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 286–297. – DOI 10.20295/1815-588x-2022-19-2-286-297.

19 Курилкин, Д. Н. Определение потерь в силовых выпрямительных установках тепловозов при различных режимах нагружения / Д. Н. Курилкин // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 6 (96). – С. 19–26. – ISSN 1997-0722.

20 Разработка показателей энергоэффективности тепловозов и методик их определения. Экспериментальные исследования по определению показателя энергоэффективности локомотивов (ПЭЛ) для оценки качества ремонта тепловозов (на примере тепловозов 2ТЭ116У, ТЭП70БС, ТЭМ18ДМ) : техн. отчет № 27-2014-19. Рук. работы Перминов В. А. – Коломна : ВНИКТИ, 2014. – 175 с.

21 Грачев, В. В. Прескриптивный контроль энергоэффективности силовой установки тепловоза с использованием интеллектуальных методов обработки измерительной информации встроенных средств диагностики : монография / В. В. Грачев. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2019. – 106 с. – ISBN 978-5-7641-1400-2.

17 Kurilkin, D. N. Determination of energy costs for recharging the diesel locomotive battery according to the microprocessor control system / D. N. Kurilkin // Izvestia of the Saint Petersburg University of Railway Communications. – 2022. – Vol. 19, No. 1. – P. 68–74. – DOI 10.20295/1815-588x-2022-19-1-68-74.

18 Kurilkin, D. N. Determination of energy costs in synchronous traction generators diesel locomotives under various loading conditions / D. N. Kurilkin // Izvestiya Peterburgskogo universiteta of Railways. – 2022. – Vol. 19, No. 2. – P. 286–297. – DOI 10.20295/1815-588x-2022-19-2-286-297.

19 Kurilkin, D. N. Determination of losses in power rectifier installations of locomotives under various loading modes / D. N. Kurilkin // Bulletin of transport of the Volga region. – 2022. – No. 6 (96). – P. 19–26. – ISSN 1997-0722.

20 Development of indicators of energy efficiency of locomotives and methods of their determination. Experimental studies to determine the energy efficiency index of locomotives (PEL) to assess the quality of repair of locomotives (using the example of diesel locomotives 2TE116U, TEP70BS, TEM18DM) : tech. Report No. 27-2014-19. Handiwork of Perminov V. A. – Kolomna : VNIKTI, 2014. – 175 p.

21 Grachev, V. V. Prescriptive control of the energy efficiency of a diesel locomotive power plant using intelligent methods for processing measurement information of built-in diagnostic tools : monograph / V. V. Grachev. – Saint Petersburg : PGUPS, 2019. – 106 p. – ISBN 978-5-7641-1400-2.

*D. N. Kurilkin, V. V. Grachev, A. G. Bragin*

#### ACCOUNTING FOR TRANSIENT PROCESSES IN A LOCOMOTIVE DIESEL GENERATOR EQUIPMENT WHEN PERFORMING TRACTION CALCULATIONS

**Abstract.** The transient processes caused by changes in the operating account a significant proportion of the operating time of the locomotive diesel generator equipment. At the same time, in traction calculations, the change in power and fuel consumption by the power plant is assumed to be instantaneous, which can lead to a decrease in their reliability. The methods of statistical processing and regression analysis of experimental data were used in the work. Based on the statistical analysis of the registration data of the on-board diagnostics subsystem of 2TE116U locomotives, a methodology for taking into account the influence of transients on the power plant power level and fuel consumption is proposed and justified. The results obtained make it possible to clarify the parameters of the traction characteristics of the locomotive and can be used when performing operational traction calculations.

**Keywords:** DSU transition process, DSU fuel consumption, DSU power reduction.

**For citation:** Kurilkin, D. N. Accounting for transient processes in a locomotive diesel generator equipment when performing traction calculations / D. N. Kurilkin, V. V. Grachev,

A. G. Bragin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 22–34. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_1\_22.

#### Сведения об авторах

##### **Курилкин Дмитрий Николаевич**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой,  
e-mail: kurilkin@pgups.ru

##### **Грачев Владимир Васильевич**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: lt@pgups.ru

##### **Брагин Александр Геннадьевич**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: lt@pgups.ru

#### Information about the authors

##### **Kurilkin Dmitry Nikolayevich**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
Chair «Locomotives and Locomotive Facility»,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor, Head of the Chair,  
e-mail: kurilkin@pgups.ru

##### **Grachev Vladimir Vasilievich**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
Chair «Locomotives and Locomotive Facility»,  
Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
e-mail: lt@pgups.ru

##### **Bragin Alexander Gennadievich**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
Chair «Locomotives and Locomotive Facility»,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: lt@pgups.ru