

УДК 629.4.053.3

Применение фильтра низких частот для снижения влияния методической погрешности измерительного тракта в структуре системы автоматического управления скоростью

В. И. Легкая

Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Легкая В. И. Применение фильтра низких частот для снижения влияния методической погрешности измерительного тракта в структуре системы автоматического управления скоростью // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 72–87. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-72-87

Аннотация

Цель: Выбор структуры системы автоматического управления скоростью электропоезда. Оценка влияния погрешности измерения скорости на динамику процессов в тяговом приводе. Обоснование применения и выбор структуры фильтра низких частот — фильтра Баттерворта. Определение совокупности критериев качества управления скоростью движения электропоезда. Решение задачи параметрического синтеза. **Методы:** Имитационного моделирования, теории автоматического управления, оптимизации. **Результаты:** Установлено отрицательное влияние наличия погрешности измерения скорости на формирование управляющего сигнала силы тяги и, как следствие, на протекание переходного процесса в тяговом приводе. В результате решения задачи параметрического синтеза системы найдены рациональные параметры пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления. Установлена зависимость изменения значений параметров закона управления от порядка фильтра Баттерворта. Выявлено, что с увеличением порядка фильтра требуется увеличивать его частоту среза. Установлено, что включение фильтра Баттерворта в структуру системы автоматического управления скоростью обеспечивает сглаживание высокочастотных составляющих в сигнале измеренной скорости. **Практическая значимость:** Разработана структура системы автоматического управления скоростью, учитывающая наличие методической погрешности измерительного устройства (импульсного датчика скорости). Полученные результаты моделирования показывают эффективность применения устройств фильтрации в структуре систем управления.

Ключевые слова: Система автоматического управления, фильтр Баттерворта, качество управления, имитационное моделирование, параметрический синтез.

В настоящее время происходит активное совершенствование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) контроля и управления движением поездов. Применение автоматизации в процессах управления обосновано высокими требованиями, предъявляемыми к обеспечению безопасности движения и соблюдению точного выполнения планового графика движения. Система автоматического управления (САУ) скоростью является одной из подсистем ИТС, представляет собой внутренний контур, подчиненный по отношению к контуру регулирования времени хода в системе автоматического ведения поездов (САВП) на уровнях автоматизации (УА1–УА4) и реализует заданные САВП режимы движения [1, 2].

Модель системы автоматического управления скоростью

Разработана математическая модель САУ скоростью электропоезда, отличающаяся от существующих тем, что учитывает наличие методической погрешности измерения в тракте измерения скорости и обладает переменной в зависимости от режима движения структурой закона управления [3]. Функциональная схема предлагаемой САУ приведена на рис. 1.

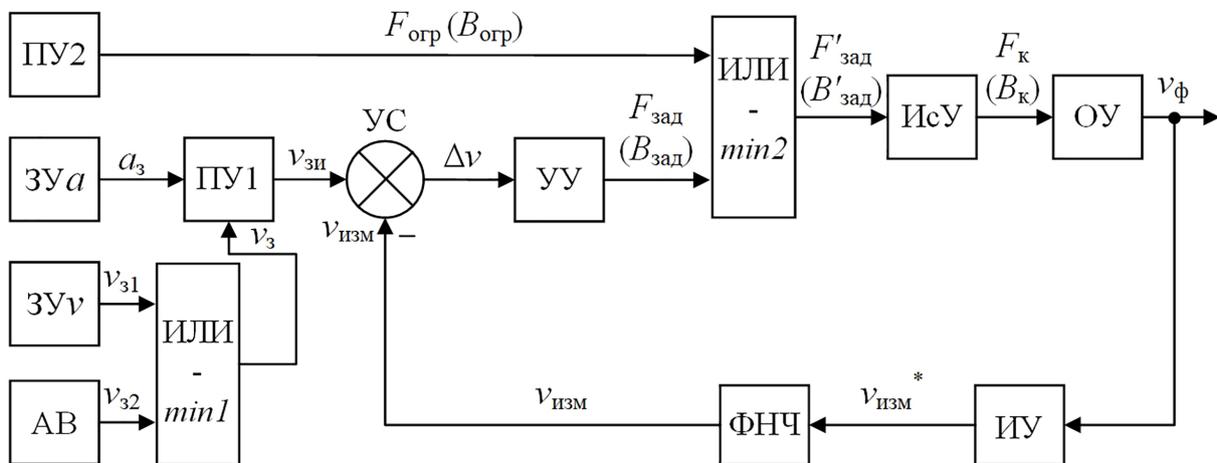


Рис. 1. Функциональная схема САУ скоростью электропоезда

В качестве объекта управления ОУ принята многомассовая модель электропоезда, движение каждого экипажа которой описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка [4]. В качестве модели межвагонной связи использована модель резинометаллического поглощающего аппарата в сочетании с беззазорным сцепным устройством. Измерительное устройство ИУ представляет собой импульсный датчик скорости с частотно-импульсной модуляцией сигнала; модель измерительного тракта будет подробно рассмотрена далее. Фильтр нижних частот ФНЧ, на вход которого поступает сигнал $v_{изм}^*$, обладающий погрешностью измерения, представляет собой фильтр Баттерворта 5-го порядка, необходимость и выбор параметров которого будут обоснованы в следующих разделах. Устройство сравнения УС реализует вычисление рассогласования Δv между отфильтрованным значением скорости $v_{изм}$ и значением $v_{зи}$, поступающим с выхода устройства ПУ1. Данное устройство реализует плавное изменение поступающего с ИЛИ-min1 минимального значения скорости $v_з$ из двух заданных: с контроллера машиниста ЗУв в виде сигнала $v_{з1}$ и контура регулирования времени хода системы автоведения АВ в виде сигнала $v_{з2}$. Характер изменения величины $v_з$ определяется темпом a_3 , заданным устройством задания ускорения ЗУа. Вычисленное рассогласование Δv поступает на вход устройства управления УУ, представляющее собой регулятор скорости, функционирующий согласно пропорционально-интегральному с прогнозом рассогласования закону управления с переменной структурой [5, 6]:

$$F_{\text{зад}}[nT] = k_1 \Delta v[nT] + \frac{1}{k_2} \sum_{i=0}^n \Delta v_i T + k_3 f_3[nT], \quad (1)$$

где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты при соответствующих частях закона управления;

$$f_3[nT] = \sum_{i=0}^M \Delta v[(n - M + i)T] L_i^{\text{э,кв,л}} \text{ — прогнозируемая в момент времени } t = nT$$

величина рассогласования $\Delta v[(n + 1)T]$;

M — количество отсчетов, используемых экстраполятором при работе.

Выбор модификации закона управления осуществляется следующим образом: до момента начала выполнения условия $v_{\text{изм}} \geq (v_3 - 2)$ км/ч или $v_{\text{изм}} \leq (v_3 + 2)$ км/ч, что соответствует переходным режимам — разгону и торможению, используется пропорциональный (П) закон. Выполнение величиной $v_{\text{изм}}$ вышеприведенных условий соответствует переходу в режим стабилизации, вследствие чего происходит переключение П-закона управления на пропорционально-интегральный (ПИ) с прогнозом рассогласования (Э) закон управления. Выходным сигналом УУ является величина заданной силы тяги $F_{\text{зад}}$ или торможения $B_{\text{зад}}$. Устройство ИЛИ-min2 определяет минимальный сигнал $F'_{\text{зад}}$ ($B'_{\text{зад}}$) из двух поступающих на его вход: $F_{\text{зад}}$ ($B_{\text{зад}}$) с устройства управления и $F_{\text{огр}}$ ($B_{\text{огр}}$), являющихся сигналом об ограничениях, введенных на тяговые и тормозные характеристики и запрограммируемых в промежуточном устройстве ПУ2. В дальнейшем с выхода ИЛИ-min2 сигнал о заданной силе тяги (торможения) поступает на вход исполнительного устройства ИСУ, математическая модель которого соответствует реализации тягового привода электропоезда и описана как апериодическое звено с постоянной времени $T_{\text{т.э.п.}} = 1,28$ с, выбранной согласно [7].

Модель измерительного устройства

Модель измерительного тракта САУ скоростью существенно влияет на показатели качества управления. В качестве измерительного устройства выбран датчик скорости с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ). Процесс определения цифрового эквивалента скорости движения заключается в подсчете вырабатываемых устройством импульсов за эталонный интервал времени, что соответствует способу преобразования частота-цифра № 1 согласно классификации [8].

Каждый из способов, приведенных в [8], характеризуется степенью его точности измерения, что определяет качество регулирования скорости. В данной работе выбор реализуемого измерительным устройством способа преобразования обоснован наихудшим значением показателя точности по причине наличия наибольшей методической погрешности измерения, возникшей из-за несовпадения

моментов начала и окончания эталонного временного интервала T импульсами счетной последовательности, а также учета только целого числа этих импульсов N в течение интервала T (рис. 2).

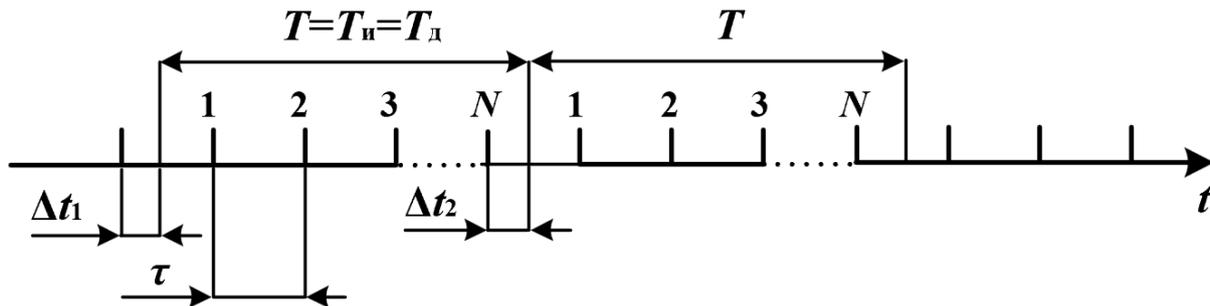


Рис. 2. Преобразование частотно-импульсного сигнала в цифровой эквивалент скорости движения

На рис. 2 использованы следующие обозначения:

Δt_1 — промежуток времени между фронтом временного интервала и предельным моментом времени, когда нулевой импульс уже не фиксируется счетным устройством;

Δt_2 — промежуток времени между спадом временного интервала и предельным моментом времени, когда импульс N еще фиксируется счетным устройством;

$T_и$ — время измерения;

$T_д$ — шаг временной дискретизации;

τ — временной интервал между импульсами.

При использовании принятого метода измерения цифровой эквивалент скорости определяется следующим образом:

$$v_{и} = \frac{s_0 N}{T}, \quad (2)$$

где $v_{и}$ — измеренное значение скорости;

s_0 — расстояние, соответствующее длине дуги окружности поверхности катания колеса, которое проходит электропоезд за время между двумя импульсами N .

Величина абсолютной методической погрешности $\Delta v_{м}$ метода измерения равна:

$$\Delta v_{м} = (\delta_2 - \delta_1) \frac{s_0}{T}, \quad (3)$$

где $\delta_1 = \frac{\Delta t_1}{\tau} = \frac{\Delta t_1 v}{s_0}$, при этом $0 \leq \delta_1 \leq 1$;

$$\delta_2 = \frac{\Delta t_2}{\tau} = \frac{\Delta t_2 v}{s_0}, \text{ при этом } 0 \leq \delta_2 \leq 1.$$

Таким образом, значение измеренной скорости с учетом методической погрешности $v_{\text{изм}}^*$:

$$v_{\text{изм}}^* = v_{\text{и}} + \Delta v_{\text{м}}. \quad (4)$$

Наибольшее абсолютное значение величины методической погрешности соответствует величине шага квантования по уровню при принятом методе преобразования скорости в цифровой эквивалент [8] и составляет:

$$\Delta v_{\text{м max}} = q = \frac{2\pi R}{z T_{\text{и}}} = 2,47 \text{ км/ч}, \quad (5)$$

где R — радиус бандажа колесной пары по кругу катания, $R = 0,46$ м;
 z — число импульсов, вырабатываемых за один оборот колеса, $z = 42$;
 $T_{\text{и}}$ — шаг временной дискретизации, $T_{\text{и}} = 0,1$ с.

В качестве закона, по которому распределяется $\Delta v_{\text{м}}$ в заданном диапазоне, согласно [8] принят треугольный закон распределения. Функция плотности распределения случайной величины $\Delta v_{\text{м}}$, описывающая соответствующее треугольное распределение, представлена в виде:

$$P(\Delta v_{\text{м}}) = \begin{cases} \frac{2}{q - |-q|} \cdot \frac{\Delta v_{\text{м}} - |-q|}{0 - |-q|}, & \text{если } -q \leq \Delta v_{\text{м}} \leq 0; \\ \frac{2}{q - |-q|} \cdot \frac{q - \Delta v_{\text{м}}}{q - 0}, & \text{если } 0 < \Delta v_{\text{м}} \leq q. \end{cases} \quad (6)$$

В данной работе для моделирования такого распределения использован метод обратных функций [9]. На первом этапе генерируется случайное число r , распределенное по равномерному закону в интервале $[0, 1]$: $r \in [0, 1]$. На втором этапе выполняется преобразование равномерно распределенной случайной величины в случайную величину, распределенную по треугольному закону. Данное преобразование выполняется с использованием следующей системы уравнений:

$$F^{-1}(r) = \begin{cases} a + \sqrt{r(m-a)(b-a)}, & \text{если } 0 \leq r \leq \frac{m-a}{b-a}, \\ b - \sqrt{(1-r)(b-m)(b-a)}, & \text{если } \frac{m-a}{b-a} \leq r \leq 1, \end{cases} \quad (7)$$

где $a = -q$ — величина, равная минимальному значению принятой погрешности;
 $b = q$ — величина, равная максимальному значению принятой погрешности;
 $m = 0$.

Результат пробного моделирования величины методической погрешности измерения скорости на интервале времени, равном $t = 50$ с, приведен на рис. 3. Как видно, рассчитанные значения величины погрешности Δv_M находятся в диапазоне от 2,47 км/ч до $-2,47$ км/ч в соответствии с заданной плотностью треугольного распределения (рис. 4).

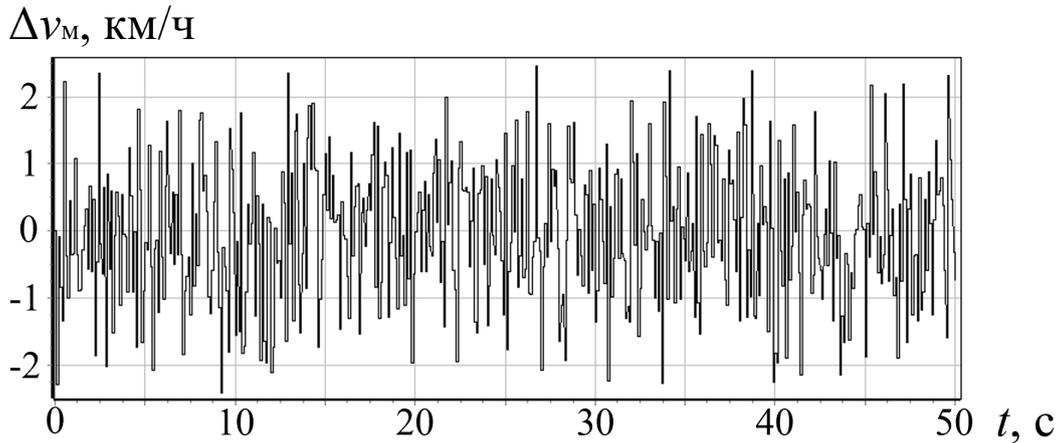


Рис. 3. Результат моделирования методической погрешности измерения

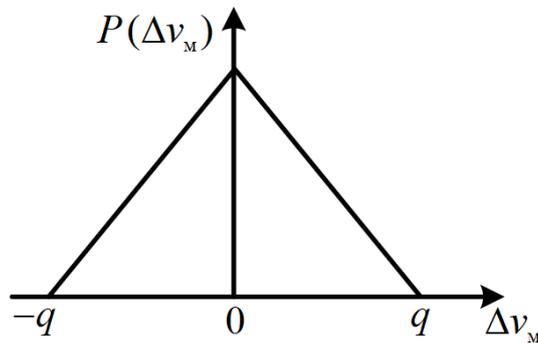


Рис. 4. График плотности распределения вероятности случайной величины погрешности по треугольному закону

Описанный выше способ преобразования скорости движения в числовой эквивалент реализован в тракте измерения, структурная схема модели которого представлена на рис. 5. Представленная модель реализует операции усреднения скорости за период дискретизации, квантования по уровню и временной дискретизации и, как было отмечено ранее, учитывает наличие Δv_M [8].

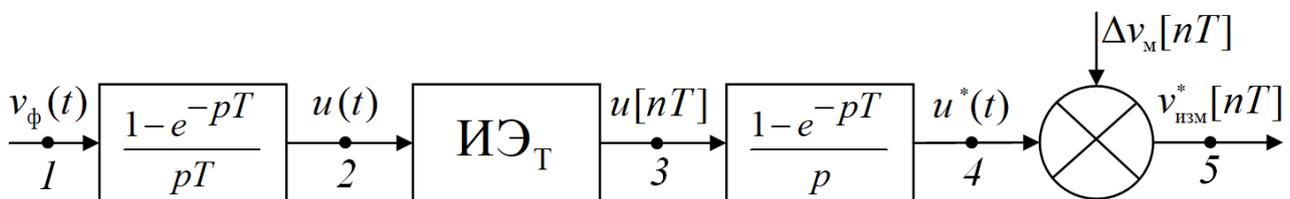


Рис. 5. Структурная схема канала измерения скорости

Звено между точками 1 и 2 реализует операцию усреднения входного сигнала, в качестве которого принимается текущая фактическая скорость движения поезда $v_{\phi}(t)$:

$$u(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_{t-T_{\text{и}}}^t v_{\phi}(t) \Delta t. \quad (8)$$

Звено между точками 2 и 3 является идеальным импульсным элементом, функцией которого является преобразование сигнала $u(t)$ в решетчатую функцию $u(t_i)$:

$$u(t_i) = u[nT] = u(t) \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT). \quad (9)$$

Звено между точками 3 и 4 выполняет операцию восстановления, доопределяя последовательность $u[nT]$ в промежутке времени $nT \leq t \leq (n+1)T$. Далее происходит наложение на сигнал $u^*(t)$ случайной величины $\Delta v_M(t)$, являющейся методической статической погрешностью. Величина цифрового сигнала $v_{\text{изм}}^*[nT]$ на выходе измерительного тракта соответствует выражению:

$$v_{\text{изм}}^*[nT] = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} v_{\phi}(t) dt + \Delta v_M[nT], \quad (10)$$

где t — текущее время.

Результаты имитационного моделирования работы САУ скоростью без фильтра в структуре

Проведено пробное имитационное моделирование работы САУ скоростью без фильтра в структуре при принятой модели измерительного тракта. Используемый в качестве ОУ электропоезд-прототип представляет собой 5-вагонный электропоезд ЭС1 общей массой 268 т. В качестве реализуемых режимов движения электропоезда по площадке выбраны следующие: разгон до $v_3 = 50$ км/ч с дальнейшей стабилизацией на заданном уровне. Время моделирования составляет $t = 70$ с. Выбор соответствующих режимов движения по площадке обоснован проведением исследования влияния выбранной структуры измерительного тракта на качество процесса управления, исключая при этом возможные внешние возмущения со стороны изменчивого профиля пути.

В качестве значений коэффициентов принятого пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления использованы значения, полученные при выполнении пробных расчетов и составляющие $k_1 = 67\ 000$, $k_2 = 0,005$, $k_3 = 28\ 000$, при этом количество отсчетов экстраполятора составило $M = 25$. Полученные в ходе моделирования зависимости от времени $v_{\text{зи}}(t)$, $v_{\phi}(t)$, $v_{\text{изм}}(t)$, $F_{\text{зад}}(t)$, $F_{\text{к}}(t)$ приведены на рис. 6, а–в.

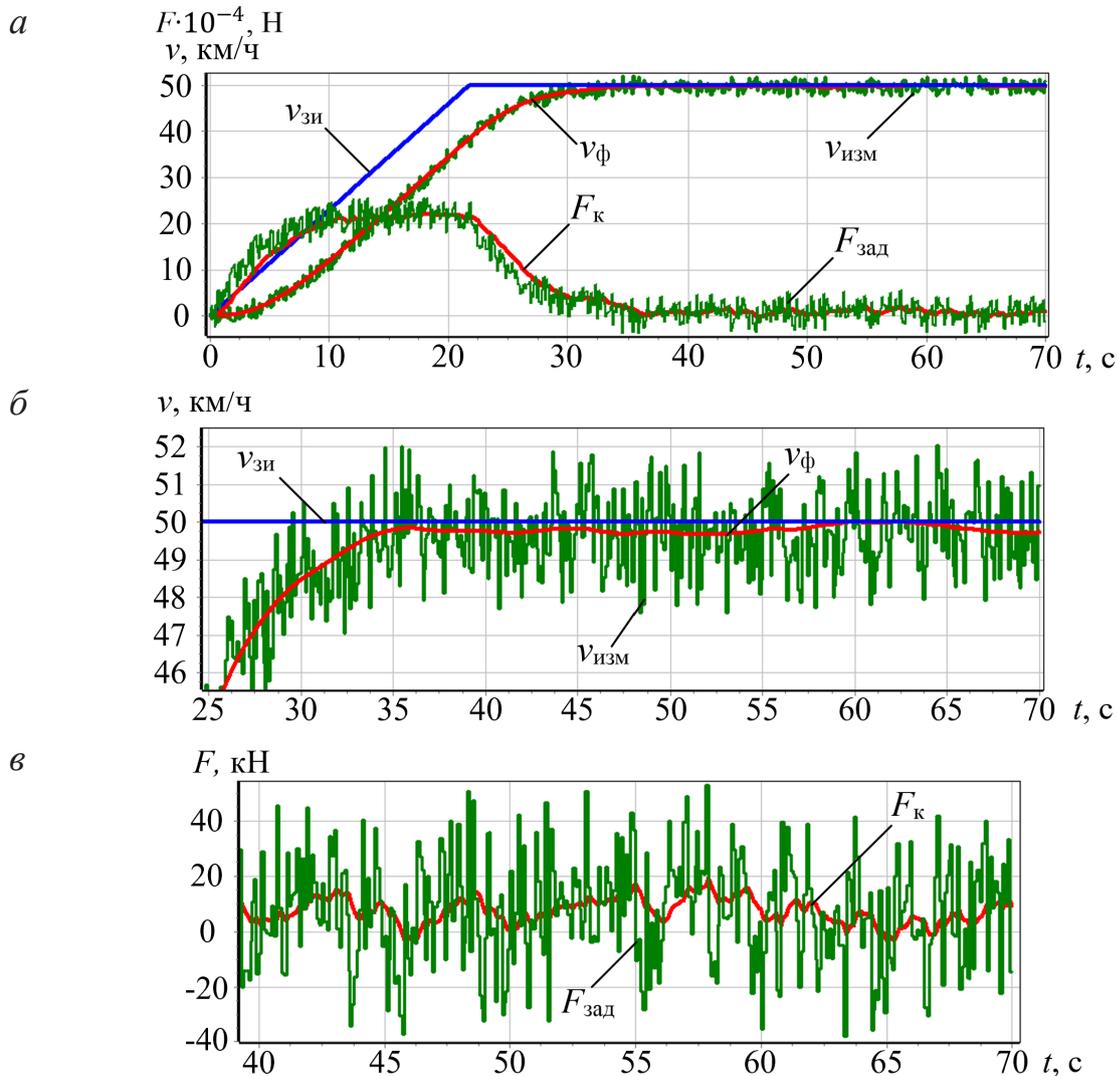


Рис. 6. Результаты моделирования работы САУ скоростью без фильтра: зависимости скоростей $v_{зи}$, $v_{изм}$, $v_{ф}$, сил тяги $F_{зад}$, $F_{к}$ от времени на интервале 0–70 с (а); зависимости скоростей $v_{зи}$, $v_{изм}$, $v_{ф}$ от времени на интервале 25–70 с (б); зависимости сил тяги $F_{зад}$, $F_{к}$ от времени на интервале 40–70 с (в)

В начале моделирования происходит разгон электропоезда, характеризующийся увеличением силы тяги и, как следствие, скорости движения. Согласно режиму движения САУ реализует пропорциональный закон управления. В момент времени 26,9 с впервые выполняется условие $v_{изм} \geq (v_3 - 2)$ км/ч, вследствие чего САУ переходит в режим стабилизации скорости, при этом происходит изменение закона управления САУ с пропорционального на пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования. Как видно, при этом заданная сила тяги $F_{зад}$ на входе тягового привода характеризуется скачкообразными знакопеременными колебаниями с наибольшей амплитудой 53 кН и скоростью изменения $\approx 15\,801$ кН/с. Хотя тяговый привод обладает значительной инерционностью и сглаживает поступающий от устройства управления сигнал $F_{зад}$, вследствие чего зависимость $F_{к}(t)$ имеет значительно меньшую частоту и амплитуду колебаний

с наибольшей амплитудой ≈ 19 кН и скоростью изменения фактической силы тяги $\approx 27,5$ кН/с, подобное знакопеременное колебательное изменение заданного и фактического значений силы тяги является недопустимым по условиям работы тягового привода. Необходимо отметить, что причиной описанного выше изменения величин $F_{\text{зад}}$ и $F_{\text{к}}$ является аддитивная помеха в сигнале измеренной скорости. При движении в режиме стабилизации фактическая скорость поддерживается на уровне заданного значения 50 км/ч, максимальное абсолютное отклонение которой составляет 0,33 км/ч.

Фильтр нижних частот Баттерворта

Улучшение протекания переходного процесса в контуре управления тяговым приводом возможно осуществить при минимизации аддитивной помехи, обусловленной методической погрешностью измерительного тракта. С этой целью в структуру САУ скоростью включен фильтр нижних частот (ФНЧ), расположенный между измерительным устройством ИУ и устройством сравнения УС, обеспечивающий фильтрацию величины измеренной скорости. В качестве ФНЧ выбран фильтр Баттерворта [10], отвечающий требованиям к виду его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), в том числе на полосах пропускания и подавления. Переходная полоса АЧХ фильтра (при частотах выше частоты среза ω_c) характеризуется монотонностью убывания со скоростью $20 \cdot n$ дБ/дек, определяемой порядком фильтра n .

Передаточная функция фильтра Баттерворта представлена как:

$$H(s) = \frac{b_0}{A(s)} = \frac{\omega_c^n}{A(s)}, \quad (11)$$

где n — порядок фильтра;

ω_c — частота среза, Гц;

$A(s)$ — характеристический полином n -го порядка.

Основными параметрами фильтра Баттерворта являются порядок n , обеспечивающий необходимую крутизну его АЧХ, и частота среза ω_c , выше которой происходит фильтрация сигнала от высокочастотных составляющих. Полином фильтра описывается как сочетание определенного количества, зависящего от порядка фильтра последовательно соединенных инерционных звеньев первого и второго порядков. Приведенные в [11] выражения полиномов являются нормализованными по частоте среза, равной $\omega_{\text{ср.н}} = 1$ Гц, поэтому для исследования эффективности применения ФНЧ в структуре САУ при различных ω_c необходимо применить операцию денормирования, заключающуюся в замене в используемом полиноме фильтра комплексной переменной s на $\frac{s}{\omega_{\text{ср}}}$:

$$H(s) = A \left(\frac{s}{\omega_{\text{cp}}} \right), \quad (12)$$

где $\omega_{\text{cp}} = \omega_c$ — заданная частота среза ненормированного фильтра.

Критерии качества управления и задача параметрической оптимизации

Система автоматического управления скоростью должна удовлетворять ряду требований. К таким требованиям относятся требования к обеспечению устойчивости системы и требования к качеству процесса управления как в переходных, так и в установившемся режимах. Качество процесса управления скоростью оценивается следующей совокупностью критериев [12]: перерегулирование σ , максимальная допустимая величина которого по условиям соблюдения безопасности движения не должна превышать $[\sigma] = 1$ км/ч; время протекания переходного процесса $t_{\text{рег}}$; величина квадратичной интегральной ошибки в установившемся режиме $I_{2\text{уст}}$. Перед включением ФНЧ в структуру САУ необходимо определиться со значениями параметров закона управления k_1, k_2, k_3, M , а также n и ω_c , при которых обеспечивается удовлетворительное качество регулирования скорости за счет фильтрации шума. Кроме этого, необходимо оценить влияние наличия фильтра различных порядков в структуре САУ на значения параметров ее закона управления k_1, k_2, k_3, M .

Для поиска рациональных параметров $k_1, k_2, k_3, M, \omega_c$ при 2–7 порядках фильтра необходимо решить задачу параметрической оптимизации системы. Принятые показатели качества предъявляют различные требования к САУ скоростью (к значениям параметров ее закона управления). Для нахождения параметров САУ, обеспечивающих удовлетворительные значения всех показателей качества, при решении поставленной задачи оптимизации использована целевая функция свертки Π , описывающая условие компромисса между установленными показателями:

$$\Pi = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{U_i - U_i^*}{U_i^{**} - U_i^*} \right\}^2}, \quad (13)$$

где U_i^* — минимальное значение i -го критерия ($i = 1, 2, \dots, m$), являющееся результатом расчета однокритериальной оптимизации по данному i -му критерию;

U_i^{**} — максимальное или допустимое значение i -го критерия.

Рациональным значениям параметров соответствует минимальное значение целевой функции Π . Для нахождения ее минимума использован метод оптимизации Нелдера — Мида [13].

Результаты имитационного моделирования работы САУ скоростью с фильтром в структуре

В ходе параметрического синтеза системы реализовано моделирование разгона электропоезда на площадке до 50 км/ч с дальнейшей стабилизацией скорости на подъеме 12 ‰, определены значения параметров k_1 , k_2 , k_3 , M , ω_c , обеспечивающие требуемый компромисс между принятыми критериями качества. Наилучшие сочетания параметров, а также значения показателей качества, полученные в результате проведения моделирования работы САУ скоростью при заданных вначале экспериментальных условиях, при каждом из порядков ФНЧ приведены в таблице.

Параметры и показатели САУ с фильтром Баттерворта 2–7 порядков

n	Параметры					Показатели		
	k_1	k_2	k_3	M	ω_c	$t_{\text{рег}}$	σ	$I_{2\text{уст}}$
2	61295	0,0000793	40639	14	5,87690	29,549	0,344	0,246
3	68017	0,0000758	33379	18	5,90357	27,135	0,190	0,171
4	61004	0,0001381	13600	19	6,02314	27,415	0,168	0,165
5	54992	0,0001123	17915	51	6,40479	28,275	0,245	0,169
6	53138	0,0001110	15851	51	6,25567	27,885	0,268	0,202
7	48400	0,0001150	8900	85	6,46805	28,835	0,275	0,246

Как видно из полученных результатов, изменение порядка фильтра n в структуре САУ оказывает влияние на параметры закона управления. Так, с увеличением порядка фильтра n : происходит уменьшение значения k_1 с 61 295 (при $n = 2$) до 48 400 (при $n = 7$), при этом значение k_2 остается практически неизменным; количество отсчетов экстраполятора M увеличивается со значения 14 до 85; значение параметра k_3 при прогнозной части уменьшается с 40 639 (при $n = 2$) до 8900 (при $n = 7$). Также отметим увеличение значения частоты среза фильтра ω_c с возрастанием его порядка.

В ходе проведенного анализа установлено, что для обеспечения удовлетворительного качества регулирования скорости за счет более эффективного процесса фильтрации следует придерживаться закономерности, заключающейся в увеличении значения используемой ω_c в соответствии с увеличением n .

В результате решения задачи параметрического синтеза системы при каждом из порядков фильтра n найдены рациональные значения параметров закона управления, обеспечивающие допустимые значения показателей качества $t_{\text{рег}}$, σ , $I_{2\text{уст}}$ (таблица), при этом основным различием полученных результатов моделирования работы САУ при n фильтра от 2-го до 7-го является характер изменения величины $v_{\text{изм}}$ и, как следствие, $F_{\text{зад}}$ на входе тягового привода. При меньших порядках фильтра (например, при $n = 2$) величина $F_{\text{зад}}$ характеризуется

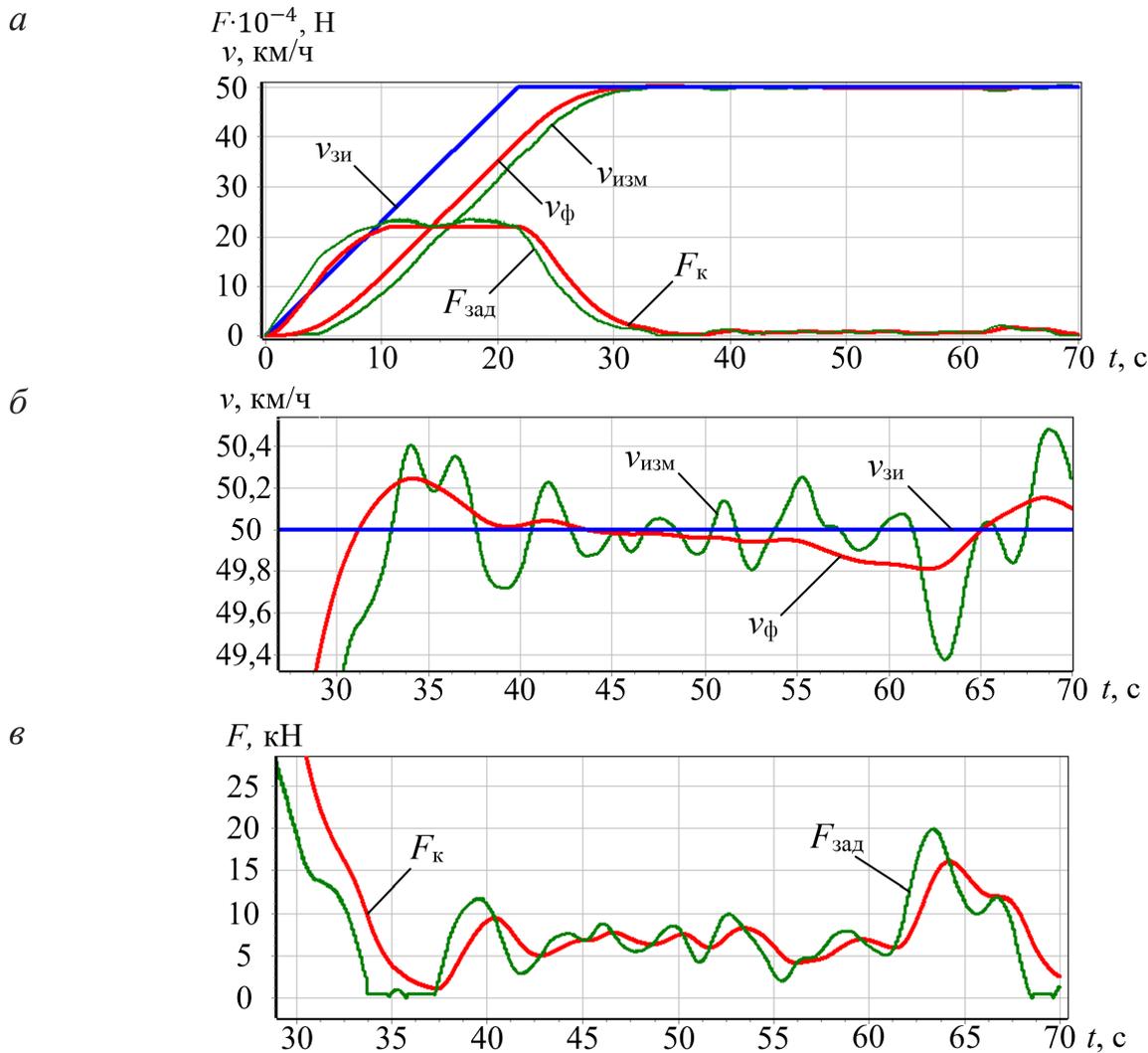


Рис. 7. Результаты моделирования работы САУ скоростью с фильтром 5 порядка: зависимости скоростей $v_{зи}$, $v_{изм}$, $v_{ф}$, сил тяги $F_{зад}$, $F_{к}$ от времени на интервале 0–70 с (а); зависимости скоростей $v_{зи}$, $v_{изм}$, $v_{ф}$ от времени на интервале 30–70 с (б); зависимости сил тяги $F_{зад}$, $F_{к}$ от времени на интервале 30–70 с (в)

знакопеременным изменением с амплитудой $\approx 34,7$ кН и скоростью изменения $\approx 635,4$ кН/с, а $F_{к}$ — амплитудой $\approx 24,8$ кН и скоростью изменения $\approx 5,5$ кН/с. При больших порядках (например, при $n = 7$) в режиме стабилизации заданная сила тяги характеризуется постоянством поддержания требуемого значения $F_{зад} > 0$, амплитудой ≈ 22 кН и скоростью изменения $\approx 124,8$ кН/с; амплитуда $F_{к}$ составила $\approx 20,8$ кН, скорость изменения $\approx 3,3$ кН/с. Для предлагаемой структуры САУ скоростью в качестве устройства, уменьшающего влияние погрешности измерения на сигнал измеренной скорости, выбран фильтр нижних частот Баттерворта 5-го порядка как оптимальный среди рассмотренных для решения поставленных задач регулирования.

На рис. 7, а–в приведены результаты моделирования при параметрах

$k_1 = 54\,992$, $k_2 = 0,0001123$, $k_3 = 17\,915$, $M = 51$, $\omega_c = 6,40479$ Гц, соответствующих $n = 5$. Показатели качества составили: $\sigma = 0,245$ км/ч, $t_{\text{рег}} = 28,275$ с, $I_{2\text{уст}} = 0,169$. Использование фильтра Баттерворта сглаживает высокочастотные колебания. Вследствие этого изменился вид кривой $F_{\text{зад}}(t)$ на входе тягового привода, характеризующейся амплитудой ≈ 20 кН и скоростью изменения $\approx 195,4$ кН/с. Фактическая сила тяги F_k в режиме стабилизации поддерживается на уровне $\approx 7,5$ кН, при этом амплитуда составляет $\approx 16,3$ кН, а скорость изменения $F_k \approx 4,6$ кН/с.

Заключение

При моделировании работы САУ скоростью учтена методическая погрешность измерительного тракта с частотно-импульсной модуляцией. Выявлено ухудшение характера изменения управляющего сигнала силы тяги, поступающего на вход тягового привода, из-за наличия аддитивной помехи, обусловленной методической погрешностью измерителя скорости. Для уменьшения влияния аддитивной помехи на качество процесса управления необходимо дополнить структуру САУ скоростью фильтром Баттерворта 5-го порядка, установленным между выходом тракта измерения скорости и входом устройства сравнения. Применение фильтра нижних частот позволяет минимизировать влияние методической погрешности измерителя скорости и улучшить характер протекания переходных процессов в тяговом электроприводе, снизив динамическое воздействие на элементы тяговой передачи. В процессе решения задачи параметрического синтеза системы установлены зависимости значений параметров закона управления САУ от порядка фильтра Баттерворта. Найденные параметры обеспечивают требуемое качество управления как переходных, так и установившихся режимов работы.

Список источников

1. ГОСТ Р 70059—2022. Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении: принципы построения и основные функциональные требования. — М.: Российский институт стандартизации, 2022.
2. Баранов Л. А. Принципы построения и модели системы автоматического управления вторым локомотивом при виртуальной сцепке / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина и др. // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8 — № 4. — С. 377–388.
3. Баранов Л. А. Система автоматического управления скоростью пригородного электропоезда / Л. А. Баранов, В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков // Электротехника. — 2024. — № 9. — С. 81–88.
4. Блохин Е. П. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер и др. — М.: Транспорт, 1986. — 263 с.

5. Баранов Л. А. Влияние прогноза рассогласования на качество управления в замкнутых автоматических системах / Л. А. Баранов, О. Е. Пудовиков, Е. П. Балакина // *Электротехника*. — 2022. — № 9. — С. 8–15.
6. Легкая В. И. Система автоматического управления скоростью с адаптацией к изменению режима движения электропоезда / В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков // *Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта: сборник трудов международной научно-практической конференции*. — Екатеринбург: УрГУПС, 2024. — С. 79–83.
7. Баранов Л. А. Модели и методы синтеза микропроцессорных систем управления скоростью электроподвижного состава с непрерывным управлением тягой / Л. А. Баранов // *Вестник МИИТ*. — 2004. — № 10.
8. Баранов Л. А. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев и др. — М.: Транспорт, 1990. — 272 с.
9. Kotz S. *Beyond Beta: Other Continuous Families of Distributions With Bounded Support And Applications* / S. Kotz, J. R. V. Dorp // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. — 2004.
10. Вадутов О. С. *Электроника. Математические основы обработки сигналов: учебник и практикум для вузов* / О. С. Вадутов. — М.: Юрайт, 2022. — 307 с.
11. Лэм Г. *Аналоговые и цифровые фильтры. Пер. с англ.* / Г. Лэм. — М.: Мир, 1982. — 589 с.
12. Баранов Л. А. *Автоматизированные системы управления электроподвижным составом: учебник: в 3 ч. Ч. 1: Теория автоматического управления* / Л. А. Баранов, А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. — 400 с.
13. Химмельблау Д. *Прикладное нелинейное программирование. Пер. с англ.* / Д. Химмельблау. — М.: Мир, 1975. — 534 с.

Дата поступления: 25.11.2024

Решение о публикации: 14.02.2025

Контактная информация:

ЛЕГКАЯ Валерия Игоревна — аспирант; tiger.rut@yandex.ru

Application of a Low-Pass Filter to Reduce the Influence of Measurement Path Errors in the Automatic Speed Control System

V. I. Legkaya

Russian University of Transport (MIIT), 9, bld. 9, Obratsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Legkaya V. I. Application of a Low-Pass Filter to Reduce the Influence of Measurement Path Errors in the Automatic Speed Control System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 72–87. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-72-87

Summary

Purpose: To select an automatic speed control system of an electric train. To estimate the speed measurement error effects on the traction drive dynamics. To justify the selection and application of the low-pass filter, particularly Butterworth filter. To determine a set of quality criteria for an electric train speed control. To solve the problem of parametric synthesis of automatic speed control system. **Methods:** Simulation modelling, automatic control theory, optimizations. **Results:** Negative influence of speed measurement errors on the formation of the traction force control signal and, consequently, on the transient process in the traction drive has been established. As a result of solving the problem of the system parametric synthesis, proportional-integral rational parameters with mismatch prediction of control law have been determined. The dependence of the value change of the control law parameters on the Butterworth filter order has been established. It has been revealed that with increasing the filter order it is required to increase its cut-off frequency. The inclusion of the Butterworth filter in the structure of the automatic speed control system has been proved to provide smoothing of high-frequency components in the measured speed signal. **Practical significance:** The structure of the automatic speed control system has been developed taking into account the presence of method error of the measuring device (pulse speed sensor). The simulation results obtained have shown the filters' efficiency in the control system.

Keywords: Automatic control system, Butterworth filter, control quality, simulation modelling, parametric synthesis.

References

1. GOST R 70059—2022. *Sistemy upravleniya i kontrolya zheleznodorozhnogo transporta dlya perevozki passazhirov v prigorodnom soobshchenii: printsipy postroyeniya i osnovnyye funktsional'nyye trebovaniya* [GOST R 70059—2022. Rail transport control and monitoring systems for suburban passenger transportation: design principles and basic functional requirements]. Moscow: Vserossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2022. (In Russian)
2. Baranov L. A., Bestem'yanov P. F., Balakina E. P. et al. Printsipy postroyeniya i modeli sistemy avtomaticheskogo upravleniya vtorym lokomotivom pri virtual'noy stsepke [Design principles and models of an automatic control system for the second locomotive with a virtual coupling]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2022, vol. 8, Iss. 4, pp. 377–388. (In Russian)
3. Baranov L. A., Legkaya V. I., Pudovikov O. E. Sistema avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu prigorodnogo elektropoyezda [Automatic speed control system for a suburban electric train]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2024, Iss. 9, pp. 81–88. (In Russian)

4. Blokhin E. P., Manashkin L. A., Stambler E. L. et al. *Raschety i ispytaniya tyazheloves-nykh poyezdov* [Calculations and testing of heavy trains]. Moscow: Transport Publ., 1986, 263 p. (In Russian)
5. Baranov L. A., Pudovikov O. E., Balakina E. P. Vliyaniye prognoza rassoglasovaniya na kachestvo upravleniya v zamknutykh avtomaticheskikh sistemakh [Influence of the mismatch forecast on the quality of control in closed automatic systems]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2022, Iss. 9, pp. 8–15. (In Russian)
6. Legkaya V. I., Pudovikov O. E. Sistema avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu s adaptatsiyey k izmeneniyu rezhima dvizheniya elektropoyezda [Automatic speed control system with adaptation to changes in the driving mode of an electric train]. *Issledovaniye i razvitiye rel'sovogo i avtomobil'nogo transporta: sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Research and development of rail and road transport: collection of papers of the international scientific and practical conference]. Yekaterinburg: UrGUPS Publ., 2024, pp. 79–83. (In Russian)
7. Baranov L. A. Modeli i metody sinteza mikroprotsessornykh sistem upravleniya skorost'yu elektropodvizhnogo sostava s nepreryvnyim upravleniyem tyagoy [Models and methods for synthesizing microprocessor-based speed control systems for electric rolling stock with continuous traction control]. *Vestnik MIIT* [MIIT Bulletin]. 2004, Iss. 10. (In Russian)
8. Baranov L. A., Golovicher Y. M., Yerofeyev E. V. et al. *Mikroprotses-sornyye sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava* [Microprocessor-based automatic control systems for electric rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1990, 272 p. (In Russian)
9. Kotz S., Dorp J. R. V. *Beyond Beta: Other Continuous Families of Distributions With Bounded Support And Applications*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2004.
10. Vadutov O. S. *Elektronika. Matematicheskiye osnovy obrabotki signalov: uchebnik i praktikum dlya vuzov* [Electronics. Mathematical foundations of signal processing: textbook and practical training for universities]. Moscow: Yurayt Publ., 2022, 307 p. (In Russian)
11. Lem G. *Analogovyye i tsifrovyye fil'try. Per. s angl.* [Analog and digital filters. Translated from English]. Moscow: Mir Publ., 1982, 589 p. (In Russian)
12. Baranov L. A., Savos'kin A. N., Pudovikov O. E. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya elektropodvizhnym sostavom: uchebnik: v 3 ch. CH. 1: Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automated control systems for electric rolling stock: textbook: in 3 parts. Part 1: Theory of automatic control]. Moscow: FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2013, 400 p. (In Russian)
13. Khimmel'blau D. *Prikladnoye nelineynoye programmirovaniye. Per. s angl.* [Applied nonlinear programming. Translated from English]. Moscow: Mir Publ., 1975, 534 p. (In Russian)

Received: November 25, 2024

Accepted: February 02, 2025

Author's information:

Valeria I. LEGKAYA — Postgraduate Student; tiger.rut@yandex.ru