

УДК 621.313.333

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.33.2.027](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.33.2.027)

## Методика определения параметров модели асинхронного двигателя

Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Российская Федерация*

**Резюме:** В работе предложен новый итерационный метод определения параметров асинхронного двигателя. В основу расчета положены вычисления, которые основаны на измеренных значениях тока холостого хода и активного сопротивления обмотки статора асинхронного двигателя. В соответствии с предложенным алгоритмом рассчитаны параметры и построена механическая характеристика асинхронного двигателя АИР71А4. Для оценки точности расчетов проведен сравнительный анализ полученной кривой механической характеристики с аналогичной зависимостью, в основе построения которой лежит метод круговой диаграммы. Круговая диаграмма построена в соответствии с действующим межгосударственным стандартом ГОСТ 7217-87 по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания. В практической части работы с помощью экспериментального стенда выполнены замеры величины электромагнитного момента исследуемого асинхронного двигателя при различной величине скольжения на устойчивой части механической характеристики. При сравнительном анализе расчетных и экспериментальных данных установлено, что значение коэффициента детерминации данных составило  $R^2 = 0,9944$ , что свидетельствует о большой степени достоверности результатов расчетов по предложенной методике. Это дает основание для практического использования предлагаемого метода расчета в инженерной практике.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, метод расчета параметров двигателя, моделирование, круговая диаграмма, механическая характеристика.

**Для цитирования:** Кулинич Ю.М., Шухарев С.А. Методика определения параметров модели асинхронного двигателя. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2021;9(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=923> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.027

## Method for determining the parameters of an induction motor model

Y.M. Kulinich, S.A. Shuharev

*Far Eastern State Transport University,  
Khabarovsk, Russian Federation*

**Abstract:** The paper proposes a new iterative method for determining the parameters of an induction motor. The calculation is based on the measured values of the no-load current and the active resistance of the stator winding. By the proposed algorithm, the parameters were calculated, and the mechanical characteristics of the AIR71A4 engine were constructed. A comparative analysis of the resulting curve with a similar dependence was carried out to evaluate the accuracy of the calculation, which is based on the pie chart method. The pie chart is built following the current interstate standard GOST 7217-87 based on the results of open-circuit and short-circuit tests. In the practical part of the work, using an experimental stand, measurements of the magnitude of the electromagnetic moment of the investigated asynchronous motor were carried out at various values of slip on the stable part of the mechanical characteristic. In a comparative analysis of the calculated and experimental data, it was discovered that the value of the determination coefficient of the data was  $R^2 = 0.9944$ . It indicates a high degree of

reliability of the calculation results using the proposed method. It provides a basis for the practical use of the proposed calculation method in engineering practice.

**Keywords:** induction motor, engine parameter calculation method, modeling, pie chart, mechanical characteristic.

**For citation:** Kulinich Y.M., Shuharev S.A. Method for determining the parameters of an induction motor. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=923> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.027 (In Russ).

## Введение

Асинхронные электродвигатели получили наибольшее распространение в самых различных типах современного электропривода. Расширению диапазона применения этих двигателей способствовало создание полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов, позволяющих значительно расширить область применения регулируемого асинхронного привода в различных устройствах промышленности и транспорта. Первая серия отечественных асинхронных двигателей серии А с короткозамкнутым ротором была выпущена в 1945 году. В последующем линейку двигателей составили серии А2, А02, 3А [1-3]. Асинхронный двигатель серии 4А был разработан и запущен в серию уже в 1971 году. Это была последняя серия двигателей, по которой в справочнике [2] опубликованы все его паспортные данные [4]. По следующим разработкам, например, серии АИР, производители закрывают техническую информацию по обмоточным данным двигателей, ограничиваясь несколькими позициями паспортных данных о номинальных значениях мощности, частоты вращения, крутящем моменте и коэффициентах для токов и моментов. Эти данные не позволяют рассчитать механическую характеристику двигателя, необходимую для выбора нагрузки двигателя во многих практических приложениях. Данная работа является попыткой устранить указанные ограничения.

## Постановка задачи

Целью работы является разработка методики определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для построения его механической характеристики с использованием справочных данных. Правомерность полученных результатов может быть подтверждена в результате сравнения аналитического расчета с экспериментальными данными, полученными на устойчивом участке механической характеристики исследуемого двигателя. В качестве объекта исследования выбран асинхронный двигатель АИР71А4 мощностью 0,55 кВт с номинальной частотой вращения 1370 об/мин [5].

## Описание метода

Электромагнитный момент, развиваемый на валу асинхронной машины, определяется выражением [6]:

$$M(s) = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{\omega_1 s \left[ (r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + x_k^2 \right]}, \quad (1)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f$  – угловая частота сетевого напряжения, рад/с;

$m_1, p$  – число фаз и пар полюсов обмотки статора, соответственно;

$U_1$  – фазное напряжение обмотки статора;

$\omega$  – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

$s = (\omega_1 - \omega) / \omega_1$  – скольжение двигателя;

$x_k = x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2}$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания;

$r_1, x_{\sigma 1}$  – активное и индуктивное сопротивление фазы обмотки статора;

$r'_2, x'_{\sigma 2}$  – приведенное к статорной обмотке активное и индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки;

$C_1$  – коэффициент приведения Т-образной к Г-образной схеме замещения двигателя.

Значение коэффициента приведения  $C_1$  рассчитывается в соответствии с выражением [7]:

$$C_1 = 1 + \frac{z_k}{2z_{\mu}} \cong 1 + \frac{I_0}{2k_{\text{пт}} I_{\text{н}}} = 1 + \frac{\sqrt{3} U_{1\text{н}} \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}}{2k_{\text{пт}} P_{\text{н}}} I_0 = c_1 e^{-j\alpha}, \quad (2)$$

где  $z_{\mu}$  – общее сопротивление намагничивающей цепи;

$k_{\text{пт}} = I_{\text{п}} / I_{\text{н}}$  – кратность пускового тока;

$I_0$  – ток идеального холостого хода при  $s = 0$ ;

$P_{\text{н}}$  – номинальная механическая мощность на валу двигателя, Вт;

$\eta_{\text{н}}$  – к.п.д. двигателя в номинальном режиме;

$U_{1\text{н}}$  – номинальное фазное напряжение обмоток статора;

$\cos \varphi_{\text{н}}$  – коэффициент мощности в номинальном режиме.

Для определения приведенного сопротивления роторной обмотки  $r'_2$  возьмем первую производную от электромагнитного момента  $dM(s)/ds$  в начальной точке характеристики при  $s = 0$ . Для этого уравнение (1) представим в виде:

$$M(s) = \frac{K}{s \left[ (r_1 + c_1 r'_2 / s)^2 + x_k^2 \right]}, \quad (3)$$

где  $K = \frac{m_1 p U_{1\text{н}}^2 r'_2}{\omega_1}$ .

Значение производной:

$$\left. \frac{dM(s)}{ds} \right|_{s=0} = K \frac{1}{c_1^2 (r'_2)^2} = \frac{m_1 p U_{1\text{н}}^2}{\omega_1 c_1^2 r'_2}. \quad (4)$$

Производную от электромагнитного момента, вычисленную в соответствии с (4), можно приближенно приравнять к приращению номинального момента относительно номинального скольжения  $\Delta M_{\text{н}} / \Delta s_{\text{н}}$ .

Значение производной в выражении (4) является завышенным по отношению  $\Delta M_{\text{н}} / \Delta s_{\text{н}}$ , поскольку наклон касательной к механической характеристике в точке  $s = 0$  будет несколько больше наклона секущей, проходящей через точку номинального режима. Учтем это обстоятельство с помощью поправочного коэффициента  $K_{\text{пп}} < 1$  в выражении (4). В результате этого уточнения получаем:

$$K_{\text{пп}} \frac{m_1 p U_{1\text{н}}^2}{\omega_1 c_1^2 r'_2} = \frac{\Delta M_{\text{н}}}{\Delta s_{\text{н}}} = \frac{M_{\text{н}}}{s_{\text{н}}}, \quad (5)$$

где  $M_{\text{н}}$  – номинальный момент;

$s_{\text{н}}$  – номинальное скольжение.

Из последнего уравнения можно выразить значение приведенного сопротивления  $r'_2$ :

$$r_2' = K_{\text{ин}} \frac{m_1 p U_{\text{ин}}^2 s_{\text{н}}}{\omega_1 c_1^2 M_{\text{н}}} . \quad (6)$$

Величину критического скольжения скр можно вычислить путем приравнивания к нулю первой производной электромагнитного момента  $dM(s) / ds = 0$ . В результате вычисления производной и приравнивания ее к нулю получим:

$$\frac{dM(s)}{ds} = s^2 (r_1^2 + x_k^2) - c_1^2 (r_2')^2 = 0 ,$$

откуда значение критического скольжения скр рассчитывается в соответствии с выражением:

$$s_{\text{кр}} = \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} . \quad (7)$$

Из уравнения (7) можно получить соотношение для вычисления значения индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$x_k^2 = \left( \frac{c_1 r_2'}{s_{\text{кр}}} \right)^2 - r_1^2 . \quad (8)$$

Подставляя значение  $s_{\text{кр}}$  из (7) в исходное уравнение (1) для электромагнитного момента, получаем выражение для максимального момента:

$$M_{\text{max}} = \frac{p m_1 U_{\text{ин}}^2 r_2'}{s_{\text{кр}} \omega_1 \left[ \left( r_1 + c_1 r_2' / s_{\text{кр}} \right)^2 + x_k^2 \right]} . \quad (9)$$

Проведя необходимые преобразования, получим расчетную формулу для вычисления  $M_{\text{max}}$ :

$$M_{\text{max}} = \frac{p m_1 U_{\text{ин}}^2 \sqrt{r_1^2 + x_k^2}}{c_1 \omega_1 \left[ 2r_1^2 + 2r_1 \sqrt{r_1^2 + x_k^2} + 2x_k^2 \right]} . \quad (10)$$

Подставляя в полученное уравнение значение  $x_k^2$  из (8), а также с учетом того, что  $\sqrt{r_1^2 + x_k^2} = c_1 r_2' / s_{\text{кр}}$ , получаем:

$$M_{\text{max}} = \frac{p m_1 U_{\text{ин}}^2}{2 \omega_1 c_1 \left( r_1 + c_1 r_2' / s_{\text{кр}} \right)} . \quad (11)$$

С другой стороны, значение  $M_{\text{max}}$  может быть получено через значение номинального момента  $M_{\text{н}}$  на валу двигателя по формуле:

$$M_{\text{max}} = \lambda M_{\text{н}} = \frac{\lambda p P_{\text{н}}}{(1 - s_{\text{н}}) \omega_1} . \quad (12)$$

где  $\lambda$  – перегрузочная способность двигателя.

Приравняем выражения (11) и (12) и проведем необходимые преобразования с учетом соотношения  $r_1 = \beta c_1 r_2'$ . Для значения коэффициента  $\beta$  получаем следующее соотношение:

$$\beta = \frac{m_1 U_1^2 (1 - s_{\text{н}})}{2 c_1^2 P_{\text{н}} \lambda r_2'} - \frac{1}{s_{\text{кр}}} = A - \frac{1}{s_{\text{кр}}} . \quad (13)$$

Представим уравнение механической характеристики двигателя в форме Клосса:

$$\frac{M_n}{M_{\max}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{2(1 + \beta s_{\text{кр}})}{s_n/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s_n + 2\beta s_{\text{кр}}} \quad (14)$$

После преобразования (14) получаем:

$$[\beta(2\lambda s_n - 2s_n) - 1]s_{\text{кр}}^2 + 2\lambda s_n s_{\text{кр}} - s_n^2 = 0. \quad (15)$$

Поставляя в полученное уравнение значение  $\beta$  из выражения (13) и проводя необходимые преобразования, получим квадратное уравнение относительно значения критического скольжения  $s_{\text{кр}}$ :

$$as_{\text{кр}}^2 + bs_{\text{кр}} - c = 0, \quad (16)$$

где  $a = 2s_n(\lambda - 1)A - 1$ ;  $b = 2s_n$ ;  $c = s_n^2$ .

Решая это уравнение относительно  $s_{\text{кр}}$ , получим:

$$s_{\text{кр}1,2} = \frac{-2s_n \pm \sqrt{4s_n^2 + 4[2s_n(\lambda - 1)A - 1]s_n^2}}{2[2s_n(\lambda - 1)A - 1]}. \quad (17)$$

Входящее в расчетную формулу (1) электромагнитного момента значение индуктивного сопротивления короткого замыкания определим из выражения (8):

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{c_1 r_2'}{s_{\text{кр}}}\right)^2 - r_1'^2}. \quad (18)$$

Входящее в большинство полученных выражений значение коэффициента приведения  $c_1$  рассчитаем в соответствии с выражением (2) при измеренном значении тока холостого хода  $I_0 = 0,9875$  А и паспортных данных двигателя. В результате расчета получаем:

$$C \approx c_1 = 1 + \frac{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,705 \cdot 0,7 \cdot 0,9875}{2 \cdot 5 \cdot 550} = 1,0337.$$

Значение коэффициента  $c_1$  зависит от мощности двигателя и находится в диапазоне  $1,02 < c_1 < 1,2$  [8].

### Разработка алгоритма

Определение численного значения поправочного коэффициента  $K_{\text{пп}}$  производится итерационным методом. Для этого задается его некоторое начальное значение  $K_{\text{пп}}^{\text{нач}}$ , которое затем корректируется до получения равенства измеренного  $r_1^{\text{изм}}$  и расчетного значения  $r_1$  активного сопротивления обмотки статора. При достижении равенства  $r_1 = r_1^{\text{изм}}$  осуществляется расчет механической характеристики двигателя  $M = f(s)$  по числовым значениям  $r_1, r_2', x_k$ , полученным при достижении этого равенства. Алгоритм расчета параметров асинхронного двигателя показан на Рисунке 1.

В блоке 1 осуществляется ввод исходных паспортных данных двигателя ( $M_n, n_n, U_{1н}, \dots$ ), а также измеренные значения тока холостого хода  $I_0$  и активного сопротивления обмотки статора  $r_1^{\text{изм}}$ . В блоке 2 устанавливается некоторое начальное значение (0,9 – 0,95) коэффициента  $K_{\text{пп}}$ .

В блоках 4 и 6 вычисляются необходимые в расчете значения коэффициентов  $A, C_1$  и  $\beta$ , а также величина критического скольжения  $s_{\text{кр}}$  (блок 5). Расчет параметров асинхронного двигателя  $r_2', x_k$  и  $r_1$  входящих в расчетную формулу для построения  $M = f(s)$ , выполняется в блоках 3, 7 и 8.

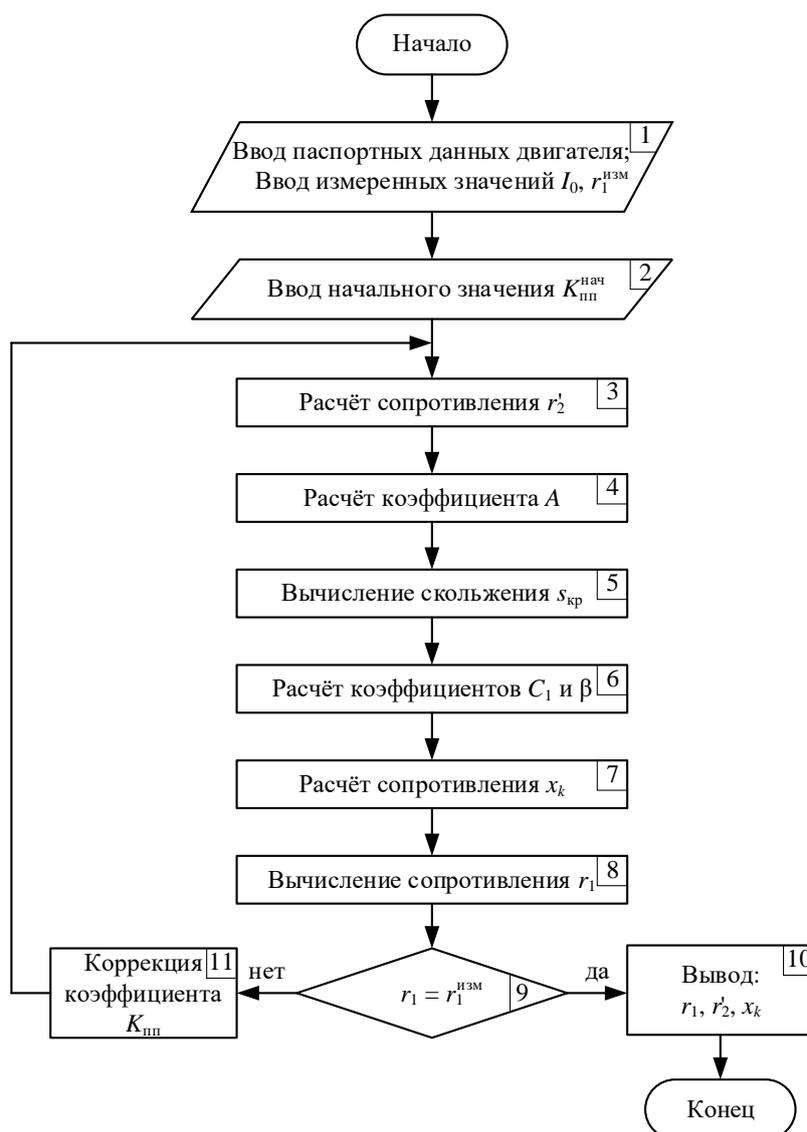


Рисунок 1 – Алгоритм расчета параметров асинхронного двигателя  
 Figure 1 – Algorithm for calculating the parameters of an induction motor

В блоке 9 осуществляется сравнение измеренного значения сопротивления обмотки  $r_1^{\text{изм}}$  со значением  $r_1$ , вычисленным во время последней итерации. Если эти значения отличаются, то блоком 11 производится коррекция величины коэффициента  $K_{\text{np}}$ , после чего расчет в блоках 3-8 повторяется до достижения равенства значений  $r_1 = r_1^{\text{изм}}$ . Коррекция коэффициента  $K_{\text{np}}$  может осуществляться, например, методом экстремального регулирования [9], позволяющего свести к минимуму различие между  $r_1$  и  $r_1^{\text{изм}}$ . Полученные в расчете параметры асинхронного двигателя  $r_2'$ ,  $x_k$  и  $r_1$  заносятся в блок 10 и используются при построении механической характеристики асинхронного двигателя  $M = f(s)$ .

В результате выполненных расчетов получены следующие параметры двигателя:

$$r_2' = 17,60 \text{ Ом}, x_k = 30,95 \text{ Ом} \text{ и } r_1 = 12,45 \text{ Ом}$$

при рассчитанном значении критического скольжения  $s_{\text{кр}} = 0,51$ .

### Метод круговой диаграммы

Установлено, что при постоянных значениях электрических параметров асинхронных двигателей и определенных первичных значениях напряжения  $U_1 = \text{const}$  и частоты  $f_1 = \text{const}$  геометрическим местом концов вектора первичного тока  $I_1$  является окружность, получившая название круговой диаграммы асинхронного двигателя.

С помощью круговой диаграммы можно определить электрические параметры асинхронной машины в различных режимах ее работы, определяемых величиной скольжения  $s$ . Можно также построить как основные характеристики двигателя: графики зависимости электромагнитной мощности  $P_{эм}$ , электромагнитного момента  $M_{эм}$  и первичного тока  $I_1$  от величины скольжения  $s$ , так и изменение параметров к.п.д. и  $\cos\varphi_1$  в зависимости от величины первичного тока  $I_1$ .

Круговая диаграмма называется точной, поскольку она позволяет учитывать величины модуля  $c_1$  и аргумента  $\alpha$  поправочного коэффициента  $C_1 = c_1 e^{-j\alpha}$  при переходе от Т- к Г-образной схеме замещения асинхронного двигателя.

На практике построение круговой диаграммы для асинхронного двигателя следует выполнять в соответствии с требованиями раздела 4 (Построение окружности тока) межгосударственного стандарта ГОСТ 7217-87 [10]. Круговая диаграмма двигателя должна иметь вид, показанный на Рисунке 2.

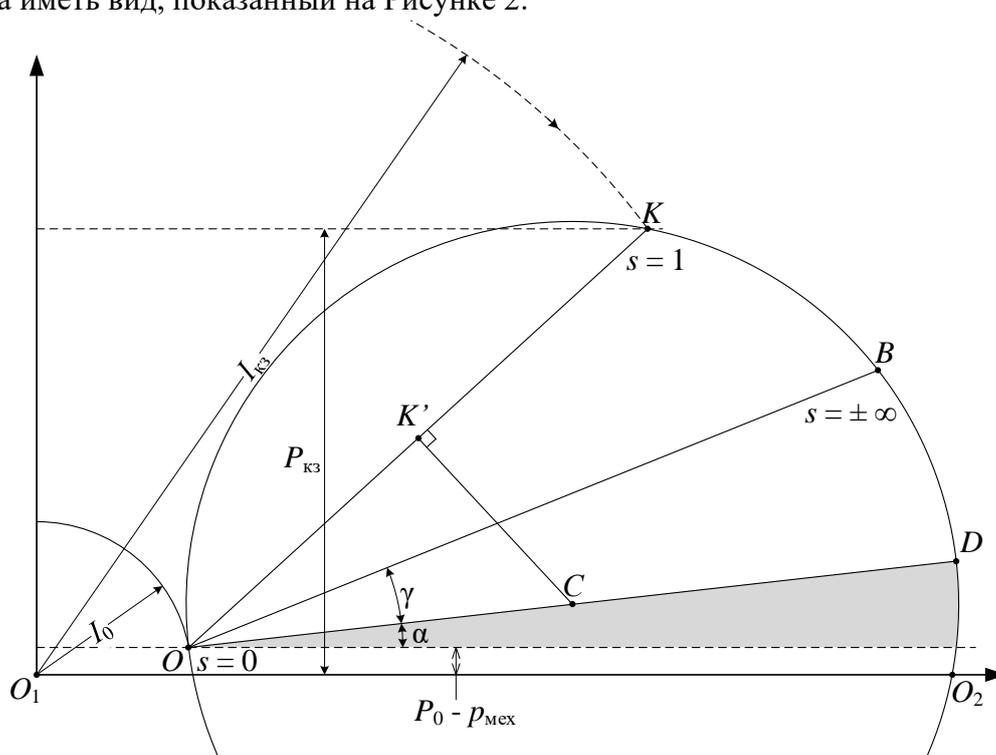


Рисунок 2 – Построение круговой диаграммы асинхронного двигателя  
 Figure 2 – Plotting a pie chart of an induction motor

Диаграмма представляет собой окружность, проходящую через точки, которым соответствует величины скольжения  $s = 0$ ,  $s = 1$  и  $s = \pm\infty$ . Точка  $O$  относится к режиму идеального холостого хода ( $s = 0$ ), положение точки  $K$  определяется режимом короткого замыкания ( $s = 1$ ) двигателя. Точка  $B$  соответствует теоретически большой величине скольжения  $s = \pm\infty$ . Дуга окружности  $OK$  круговой диаграммы соответствует двигательному режиму работы, дуга  $OB$  определяет работу асинхронного двигателя в генераторном режиме, режим электрического торможения определен положением точек на дуге  $KB$ .

При определении положения точек  $O$  и  $K$  используются данные опытов холостого хода и короткого замыкания двигателя. Опыт холостого хода производится при отсутствии нагрузки на валу двигателя, когда из сети потребляется небольшая по величине мощность холостого хода  $P_0$ . Из этого опыта необходимо определить координату точки  $O$  диаграммы, соответствующие режиму идеального холостого хода ( $s = 0$ ).

В режиме реального холостого хода величина скольжения  $s \neq 0$ , что обусловлено различными видами потери мощности, характерными для этого режима работы. Основная составляющая потерь вызвана механическими потерями  $p_{\text{мех}}$  в электромагнитной муфте испытательного стенда, а также в двигателе постоянного тока, жестко закрепленными на одном валу с асинхронным двигателем. Рассчитав эту составляющую потерь, можно определить положение точки  $O$  в режиме идеального холостого хода.

В соответствии с энергетической диаграммой работы асинхронного двигателя в двигательном режиме, сумма магнитных  $p_{\text{мг}}$  и механических потерь  $p_{\text{мех}}$  в режиме холостого хода получается после вычитания из мощности холостого хода  $P_0$  значения электрических потерь  $p_{\text{эл1}} = m_1 I_0^2 r_1$  в обмотке статора:

$$p_{\text{мг}} + p_{\text{мех}} = P_0 - m_1 I_0^2 r_1, \quad (19)$$

где  $I_0$  – фазный ток статора в режиме холостого хода;  
 $r_1$  – активное сопротивление обмотки статора.

В расчете не учитываются незначительные по величине потери мощности в обмотке ротора  $p_{\text{эл2}} = sP_{\text{эм}}$  и добавочные потери:  $p_{\text{доб}} \approx 0,005P_0$ .

Для определения величины механических потерь  $p_{\text{мех}}$  построим по опытным данным зависимость величины суммарных потерь  $p_{\text{мг}} + p_{\text{мех}}$  от квадрата фазного напряжения  $U_1^2$  исследуемого двигателя АИР71А4. При построении графика искомой зависимости используем выражение (19), в которое подставляются полученные в опыте значения мощности  $P_0$  и тока  $I_0$  при различных значениях напряжения  $U_1$ . В результате проведенного исследования получена зависимость  $p_{\text{мг}} + p_{\text{мех}} = f(U_1^2)$ , представленная на Рисунке 3.

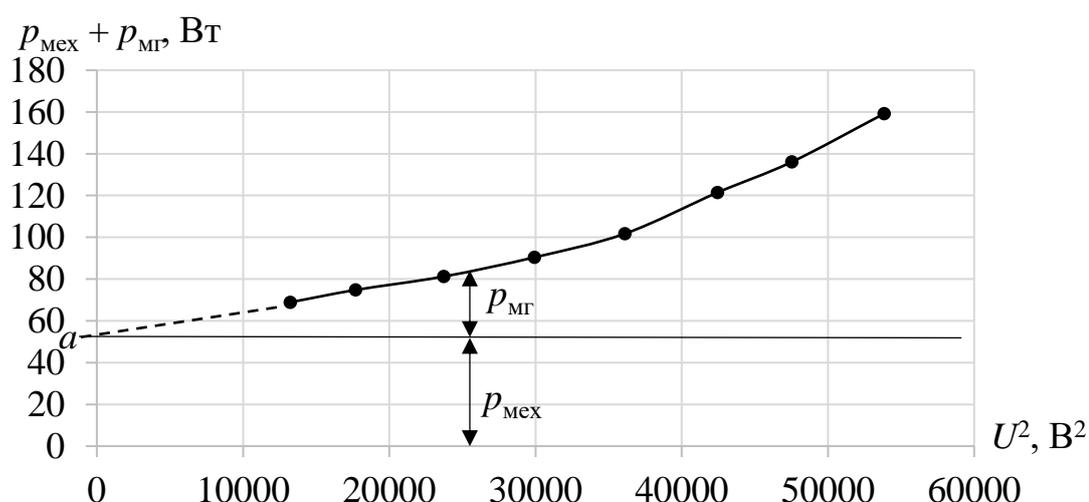


Рисунок 3 – Зависимость магнитных  $p_{\text{мг}}$  и механических  $p_{\text{мех}}$  потерь асинхронного двигателя АИР71А4

Figure 3 – Dependence of the magnetic and mechanical losses of the AIR71A4 induction motor

Поскольку измерение параметров двигателя производится при фиксированной частоте его вращения, то величина механических потерь  $p_{\text{мех}}$  остается постоянной. Величина магнитных потерь  $p_{\text{мг}}$  прямо пропорциональна квадрату фазного напряжения  $U_1^2$ , что и определило характер полученной зависимости.

Экстраполировав форму полученной кривой до точки  $a$  на оси ординат, определим в точке пересечения  $a$  искомое значение величины механических потерь  $p_{\text{мех}}$ . Величина магнитных потерь  $p_{\text{мг}}$  в точке  $a$   $p_{\text{мг}} = 0$ , поскольку эти потери определяются значением фазного напряжения при  $U_1 \rightarrow 0$ .

В соответствии с рекомендациями ГОСТ 7217-87, для графического определения положения точки  $O$  идеального холостого хода проводится горизонтальная прямая, расположенная выше линии  $O_1 - O_2$ , исходящей из начала координат, на величину  $P_0 - p_{\text{мех}}$ . Если из точки  $O_1$  провести дугу вектора  $I_0$ , то точка его пересечения с горизонталью определяет искомое положение точки  $O$  со значением  $s = 0$ . При этом принимается во внимание допущение, что токи реального  $I_0$  и идеального холостого хода  $I_{00}$  равны.

Опыт короткого замыкания проводится при заторможенном роторе асинхронного двигателя. В этом режиме питание двигателя производится пониженным питающим напряжением  $U_1$ , при котором ток статора  $I_{1к} \leq (1,0 \div 1,2)I_{1н}$ . Ток  $I_{кз}$  и мощность  $P_{кз}$  короткого замыкания рассчитываются из следующих выражений:

$$I_{кз} = I_{1к} (U_{1н} / U_1) \quad (20)$$

$$P_{кз} = P_k (U_{1н}^2 / U_1^2) \quad (21)$$

где  $U_{1н}$  – номинальное фазное напряжение статора;

$I_{1к}, P_k$  – значения тока и активной мощности, полученные из опыта короткого замыкания.

Для определения положения на диаграмме точки короткого замыкания, в соответствии с рекомендациями ГОСТ 7217-87, проводится горизонтальная прямая на уровне  $P_{кз}$  над горизонтальной осью  $O_1 O_2$ . После этого из начала координат  $O_1$  концом вектора тока  $I_{кз}$  описывается дуга до пересечения с горизонтальной линией. Точка их пересечения  $K$  определяет режим короткого замыкания асинхронного двигателя, при котором величина скольжения  $s = 1$ .

Диаметр окружности  $OD$  круговой диаграммы повернут против часовой стрелки на угол  $\alpha$ , определяемый аргументом поправочного коэффициента  $C_1$  (2). Величина угла  $\alpha$  определяется из соотношения:

$$\sin \alpha = 2I_0 r_1 / U_1 \quad (22)$$

Это выражение позволяет определить направление диаметра  $OD$  круговой диаграммы.

Соединим отрезком прямой точки  $O$  и  $K$  и восстановим из середины отрезка (точка  $K'$ ) перпендикуляр до пересечения с линией  $OD$  направления диаметра окружности. Точка пересечения  $C$  определяет положение центра окружности круговой диаграммы, из нее проводится окружность радиуса  $OC$ .

Угол  $\gamma$  между диаметром  $OD$  и линией электромагнитной мощности  $OB$ , в соответствии с ГОСТ 7217-87, определяется соотношением:

$$\text{tg} \gamma = D_a r_1 / U_{1н} \quad (23)$$

в котором диаметр окружности  $D_a = OD$  выражен в масштабе тока.

Точка  $B$  пересечения линии электромагнитной мощности  $OB$  с окружностью круговой диаграммы определяет режим работы двигателя при теоретически большой величине скольжения  $s = \pm \infty$ .

Построенную таким образом круговую диаграмму (Рисунок 2) можно использовать в различных практических приложениях.

Целью исследования является проведение сравнительного анализа различных способов получения исходных данных для построения механической  $M = f(s)$  и электромеханической  $I_1 = f(s)$  характеристик асинхронного двигателя, а также оценка точности при использовании различных методов расчета.

Для представления указанных зависимостей в виде графика с помощью круговой диаграммы необходимо дополнить полученную на Рисунке 2 диаграмму шкалой скольжения  $s$ , что позволяет определять значения момента  $M(s)$  и первичного тока  $I_1(s)$  в различных режимах работы двигателя.

Дополненная шкалой скольжения  $s$  круговая диаграмма показана на Рисунке 4.

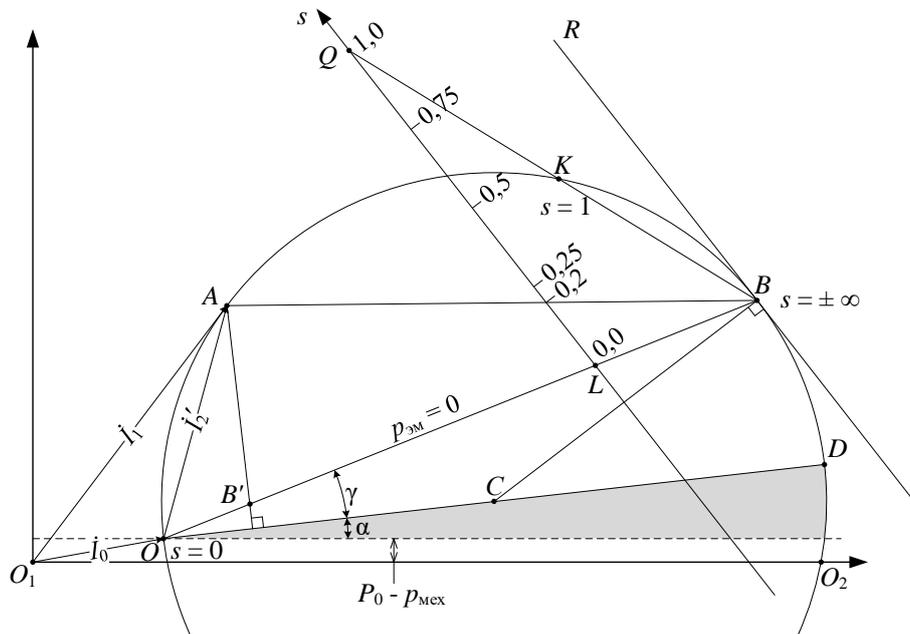


Рисунок 4 – Круговая диаграмма для тока  $I_1$  и момента  $M$   
 Figure 4 – Pie chart for current  $I_1$  and torque  $M$

Для построения шкалы скольжения на круговой диаграмме проведем через точку  $B$  с  $s = \pm\infty$  касательную к круговой диаграмме, которая перпендикулярна радиусу  $CB$ . Проведем через некоторую точку  $L$  на прямой  $OB$  линию  $LQ$ , параллельную касательной  $BR$ . Соединим и продолжим до пересечения с прямой  $LQ$  точки  $B$  и  $K$  круговой диаграммы. Прямая  $LQ$  представляет собой шкалу скольжения. Точке  $Q$  соответствует единичное ( $s = 1$ ), а точке  $L$  – нулевое ( $s = 0$ ) значение скольжения  $s$ .

Определим положение некоторой точки  $A$  на окружности круговой диаграммы, которой соответствует, например, величина скольжения  $s = 0,2$ , задаваемая точкой  $p$  на шкале скольжения. Соединим для этого точки  $B$  и  $p$  и продолжим линию до пересечения с круговой диаграммой. Точка пересечения  $A$  определяет режим работы асинхронного двигателя при заданном скольжении  $s = 0,2$ .

С помощью этой же диаграммы легко построить положение вектора первичного тока  $\dot{I}_1$ , соответствующего той же величине скольжения  $s$ . Значение этого вектора определяется в соответствии со схемой замещения двигателя, а на круговой диаграмме ток  $\dot{I}_1$  получается в результате геометрического сложения двух векторов тока:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \quad (24)$$

При изменении скольжения  $s$  точка  $A$ , а также концы векторов  $I_1$  и  $I_2'$  скользят по окружности круговой диаграммы. Таким образом, с помощью круговой диаграммы можно легко построить электромеханическую характеристику двигателя  $I_1 = f(s)$ , получая численные значения тока  $I_1$  путем умножения длины вектора  $O_1A$  на масштабный коэффициент тока:  $I_1 = m_i \cdot O_1A$ .

Для определения с помощью круговой диаграммы значения электромагнитного момента  $M$  опустим из точки  $A$  перпендикуляр на диаметр  $OD$  круговой диаграммы. Отрезок прямой  $AB'$  определяет величину момента. Численное значение момента  $M$  в точке  $A$  диаграммы определяется отрезком  $AB'$  и масштабным коэффициентом момента  $m_M$ :  $M = AB' \cdot m_M$ .

Таким образом, задаваясь различной величиной скольжения  $s$ , можно с помощью круговой диаграммы графически определять значения момента  $M$  и первичного тока  $I_1$ . По полученным данным строятся графики механической  $M = f(s)$  и электромеханической  $I_1 = f(s)$  характеристик двигателя.

### Экспериментальная часть

Для проверки достоверности полученных в результате расчета зависимостей механической и электромеханической характеристик двигателя АИР71А4 использован метод физического моделирования. Целью эксперимента является получение практических данных о величине момента  $M$  и тока  $I_1$  двигателя при различной величине скольжения  $s$  и их сравнение с соответствующими расчетными значениями.

Для проведения физического моделирования использован лабораторный экспериментальный стенд [11], состоящий из механически соединенных через электромеханическую муфту исследуемого асинхронного двигателя АИР71А4 и двигателя постоянного тока типа 2ПН90МУХЛ4. С помощью муфты на валу двигателя создается управляемый тормозной момент, величина которого контролируется блоком измерения. Регулирование величины тормозного момента осуществляется посредством изменения напряжения, подводимого к муфте.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя  $n$  измеряется с помощью тахогенератора, соединенного с валом двигателя посредством механической передачи.

В муфте смонтировано также устройство для измерения величины момента на валу двигателя, основу которого составляет мостовая схема измерения, выполненная на базе тензорезисторов [12]. Внешний вид стенда показан на Рисунке 5.

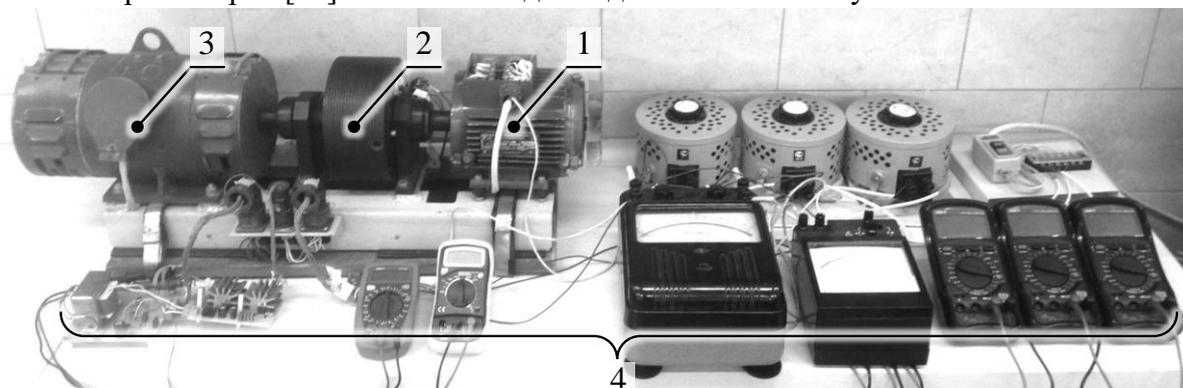


Рисунок 5 – Внешний вид экспериментального стенда:

1 - асинхронный двигатель, 2 - электромагнитная муфта, 3 - двигатель постоянного тока, 4 - блок измерения.

Figure 5 – Appearance of the experimental stand:

1 - induction motor, 2 - electromagnetic clutch, 3 - DC motor, 4 - measurement unit.

В результате выполненных исследований получены значения моментов  $M$  на валу двигателя при соответствующих частотах  $n$  вращения двигателя.

Зависимости механических характеристик  $n=f(M)$ , полученные расчетным методом представлены на Рисунке 6 в виде кривых 1 и 2. На этом же Рисунке в виде маркеров показаны экспериментальные значения механической характеристики. Приведенные значения соответствуют устойчивой области механической характеристики в диапазоне значений  $0 < M < M_{max}$ .

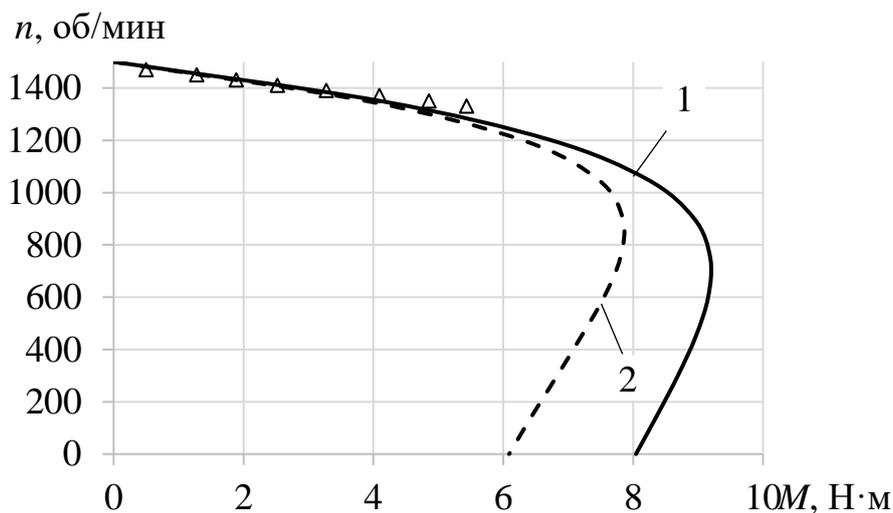


Рисунок 6 – Механические характеристики двигателя:

1 - итерационный метод вычисления параметров двигателя; 2 - метод круговой диаграммы;  $\Delta$  - экспериментальные данные.

Figure 6 – Engine mechanical characteristics:

1 - iterative method for calculating engine parameters; 2 - pie chart method;  $\Delta$  - experimental data.

Для численной оценки степени близости теоретических кривых и экспериментальных данных рассчитаем величину коэффициента детерминации  $R^2$  как показатель степени среднеквадратического отклонения координат маркеров от значений теоретических кривых 1 и 2.

В результате расчета установлено, что значение коэффициента составило  $R^2 = 0,9944$  для кривой 1, соответствующей предлагаемой методике расчета параметров двигателя. Для кривой 2, полученной с применением метода круговой диаграммы, величина  $R^2 = 0,9934$ . Полученные значения коэффициента  $R^2$  близки к 1, что свидетельствует о большой степени достоверности результатов теоретических расчетов. Практически это означает, что оба рассмотренные выше метода расчета характеристик двигателя достаточно точно отражают характер электромагнитных процессов в двигателе на устойчивой области механической характеристики.

### Заключение

В работе предложен новый итерационный метод расчета параметров модели асинхронного двигателя с использованием его основных паспортных данных. Предложенный метод позволяет построить механическую и электромеханическую характеристики двигателя. Для проверки правильности предложенного метода проведен сравнительный анализ механических характеристик двигателя, полученных итерационным методом и графическим методом с применением круговой диаграммы. В результате проведенного анализа установлено, что оба метода обладают достаточной

степенью точности, необходимой для решения практических задач. Вместе с тем, предлагаемый итерационный метод имеет существенные преимущества, обусловленные тем, что его применение не требует громоздких графо-аналитических построений, уменьшающих на практике точность вычисления. Для применения предлагаемого метода необходим ограниченный объем первичной информации и минимальный объем вычислений, процесс выполнения которого может быть легко реализован программно. Таким образом, предложенный в работе итерационный метод расчета и построения характеристик асинхронного двигателя может быть рекомендован для решения практических задач электропривода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко Е.П., Ковалев Ю.М. *Асинхронные двигатели общего назначения*. под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. М.: Энергия, 1980.
2. Кравчик А.Э. *Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник*. М.: Энергоатомиздат. 1982.
3. Радин В.И., Брускин Д.Э. *Электрические машины: Асинхронные машины: Учебник для электромех. спец. ВУЗов*. под ред. И.П. Копылова. М.: Высшая школа. 1988.
4. Крутских С.В. *Способ повышения энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором*. автореф. дисс. на соиск. уч. ст. кан. техн. наук. Воронеж. 2016.
5. *Электродвигатель АИР71А4* Доступ: [http://www.esbk.ru/products\\_info/ed/101\\_ed\\_as\\_obprom/elektrodvigatel\\_air\\_71a4.html](http://www.esbk.ru/products_info/ed/101_ed_as_obprom/elektrodvigatel_air_71a4.html)
6. Вольдек А.И. *Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений*. Л.: Энергия. 1974.
7. Макеев М.С., Кувшинов А.А. *Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным*. Вестник науки ТГУ. 2013;1(23):108-112
8. Усольцев А.А., Лукичев Д.В. *Определение параметров модели асинхронного двигателя по паспортным данным*. М.: Известия ВУЗов. Приборостроение. 2008;10(51):35-41
9. Шухарев С.А. *Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока на основе применения экстремального компенсатора реактивной мощности*: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. кан. техн. наук. Хабаровск, 2017.
10. ГОСТ 7217-87. *Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний*. М: ИПК Издательство стандартов. 1987.
11. Федотов Н.Д. *Универсальный лабораторный стенд по электротехнике ЭВ4*. 1983.
12. Алексеенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. *Применение прецизионных аналоговых ИС*. М: Радио и связь. 1981.

#### REFERENCES

1. Boyko E.P., Kovalev Yu.M. *General purpose induction motors*. Moscow, 1980.
2. Kravchik A.E. *Asynchronous motors series 4A: Handbook*. Moscow. 1982.
3. Radin V.I., Bruskin D.E. *Electrical Machines: Asynchronous Machines: A Textbook for Electromechanicals specialist Universities*. Moscow. 1988.
4. Krutskikh S.V. *A method for improving the energy efficiency of asynchronous squirrel-cage motors*. Diss. abst. for the deg. of cand. of tech. sci. Voronezh. 2016.
5. *Electric motor AIR71A4*. Available at: [http://www.esbk.ru/products\\_info/ed/101\\_ed\\_as\\_obprom/elektrodvigatel\\_air\\_71a4.html](http://www.esbk.ru/products_info/ed/101_ed_as_obprom/elektrodvigatel_air_71a4.html)

6. Voldek A.I. *Electric machines: A textbook for students of higher. tech. study. institutions.* Leningrad, 1974.
7. Makeev M.S., Kuvshinov A.A. *Algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of an induction motor according to catalog data.* *TSU Science Bulletin*, 2013;1(23):108-112
8. Usoltsev A.A., Lukichev D.V. *Determination of the parameters of the asynchronous motor model according to the passport data.* *Izvestiya VUZov. Instrumentation*, 2008;10(51):35-41
9. Shukharev S.A. *Increasing the energy efficiency of alternating current electric locomotives based on the use of an extreme reactive power compensator.* Diss. abst. for the deg. of cand. of tech. sci. Khabarovsk, 2017.
10. State Standard 7217-87. *Rotating machines. Asynchronous motors. Test methods.* Moscow, Standartov Publ. 1987.
11. Fedotov N.D. *Universal laboratory stand for electrical engineering EV4.* 1983.
12. Alekseenko A.G., Kolombet E.A., Starodub G.I. *Applications of precision analog ICs.* Moscow. 1981.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Кулинич Юрий Михайлович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Российская Федерация.

*e-mail:* [kulinitsch@rambler.ru](mailto:kulinitsch@rambler.ru)

ORCID: [0000-0002-7725-8152](https://orcid.org/0000-0002-7725-8152)

**Kulinich Yuri Mikhailovich**, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of The Department «Railway Transportation», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Far Eastern State Transport University», Khabarovsk, Russian Federation.

**Шухарев Сергей Анатольевич**, к.т.н., доцент кафедры «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Российская Федерация.

*e-mail:* [shuharevsa@gmail.com](mailto:shuharevsa@gmail.com)

ORCID: [0000-0001-7856-6651](https://orcid.org/0000-0001-7856-6651)

**Shuharev Sergey Anatolevich**, Candidate of Technical Sciences, Docent of The Department «Railway Transportation», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Far Eastern State Transport University», Khabarovsk, Russian Federation.