

## К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА И УТОЧНЕНИЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ТИПА НТА-350

*Петухов С.В., Баланцева Н.Б., Бутаков С.В., Калиничева О.А.,  
Кришьянис М.В., Хвиюзов М.А.*

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,  
Архангельск, Российская Федерация*

**Ключевые слова:** тяговый асинхронный двигатель, частотное регулирование, схема замещения, высшие временные гармоники, поверхностный эффект.

**Аннотация.** Данная статья посвящена расчету характеристик асинхронного тягового двигателя НТА-350 электропоезда ЭНЗ при частотном управлении с оптимальными законами регулирования, которые применяются в современном приводе электропоездов; нахождению потерь от влияния высших гармонических в кривой тока статора при питании асинхронного двигателя от статического преобразователя с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), что сказывается на уменьшении КПД двигателя. Также, в работе рассматривается разработка методики расчета характеристик асинхронного двигателя при частотном управлении с учетом насыщения стали (по характеристике холостого хода), а также приближенного учета потерь в стали магнитопровода.

## ON THE ISSUE OF DEVELOPING AN ALGORITHM AND CLARIFYING THE CALCULATION OF THE CHARACTERISTICS OF AN ASYNCHRONOUS TRACTION MOTOR OF THE NTA-350 TYPE

*Petukhov S.V., Balantseva N.B., Butakov S.V., Kalinicheva O.A.,  
Krishyanis M.V., Khviyuzov M.A.*

*Northen (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk,  
Russian Federation*

**Keywords:** traction asynchronous motor, frequency control, replacement circuit.

**Abstract.** In this paper, the laws of motor control will be considered as an integral part of the electric drive system. The asynchronous traction motor NTA-350 of the ENZ electric train was selected for the study. The work is devoted to the calculation of the characteristics of an engine with frequency control with optimal control laws that are used in modern electric train drive; finding losses from the influence of higher harmonic in the stator current curve when powering an asynchronous motor from a static converter with pulse width modulation (PWM), which affects the reduction of engine efficiency. Also, the task is to develop a methodology for calculating the characteristics of an asynchronous motor with frequency control, taking into account the saturation of steel (according to the idling characteristic), as well as approximate accounting for losses in the steel of the magnetic circuit.

подавляющее большинство электропоездов и автономных локомотивов с электрической передачей оборудовано коллекторными электродвигателями. Наряду с благоприятными тяговыми свойствами и высокими технико-экономическими показателями коллекторным машинам присущи недостатки, связанные с наличием коллектора. Современные тяговые двигатели

постоянного или пульсирующего тока с индивидуальным приводом осей при мощностях порядка 1000 кВт являются предельно используемыми. Ограничивающими факторами являются повышенная коммутационная напряженность машин и механическая прочность коллектора и креплений якорной обмотки. Наличие коллектора снижает эксплуатационную надежность и усложняет ремонт тягового двигателя.

Для того, чтобы конструкция тягового двигателя локомотива с электрической передачей была проста и надежна, целесообразно применить асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Применение асинхронного тягового привода в электропоездах обеспечивает [1]:

- Снижение на 20-25% затрат на производство за счет уменьшения числа моторных вагонов в составе поезда, что стало возможным благодаря повышенной мощности тягового привода;

- Уменьшение на 15-20% расхода электроэнергии в эксплуатации за счет улучшения тяговых свойств и возврата энергии в систему электроснабжения в режиме рекуперативного торможения;

- Сокращение расходов на техническое обслуживание и ремонт за счет применения более простых по конструкции тяговых электродвигателей и бесконтактного силового электрооборудования;

- Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава за счет повышения скорости движения и уменьшения времени нахождения в техническом обслуживании и ремонте.

- Электропоезд ЭНЗ предназначен для эксплуатации на линиях, электрифицированных по системе переменного тока напряжением 27,5 кВ и частотой 50 Гц.

Асинхронные тяговые электродвигатели типа НТА-350 получают питание от тиристорных преобразователей (один преобразователь на два двигателя одной тележки). Регулирование двигателей осуществляется плавным изменением частоты и напряжения [1]. Основные моменты расчета рабочих и механических характеристик тяговых двигателей представлены в работах [2-4]. Однако далеко не все физические явления, происходящие в тяговых двигателях, учитываются с достаточной степенью точности.

Рассмотрим алгоритм расчета рабочих и механических характеристик с учетом высших временных гармоник магнитного поля, насыщения магнитной системы и поверхностного эффекта.

Для определения КПД двигателя при питании его от источника несинусоидального напряжения, применим метод, использующий Т-образную схему замещения с разложением несинусоидального напряжения в ряд Фурье. Он позволяет учесть поверхностный эффект в проводниках обмоток в зависимости от формы питающего напряжения, а это значит, позволяет более достоверно определить потери мощности, оценить влияние конструктивных параметров на характеристики машины при заданном изменении выходного

напряжения преобразователя. В методе рабочий процесс описывается уравнениями для одной фазы, выраженными в комплексной форме. Несинусоидальное напряжение разлагается в ряд Фурье, и каждый  $K$ -й временной гармонике этого напряжения соответствует эквивалентная схема (рис. 1).

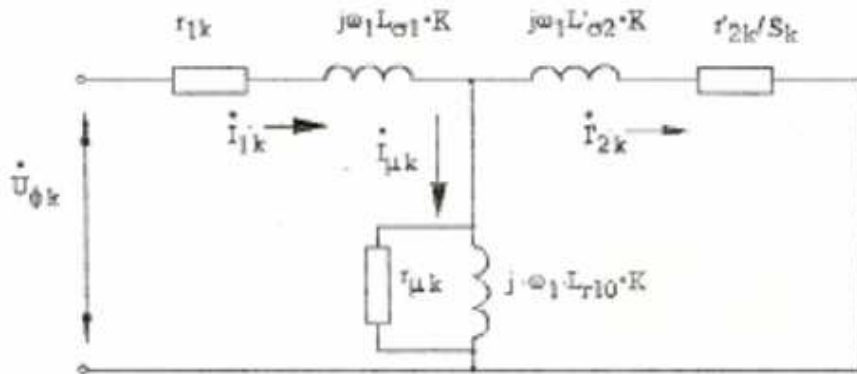


Рис. 1. Т-образная схема замещения асинхронной машины для  $K$ -й временной гармонике

Сравним КПД двигателя в номинальном режиме, при питании синусоидальным напряжением, что соответствует параметрам:  $U_{\phi k} = 635 \text{ В}$ ,  $f_{1m} = 72,6 \text{ Гц}$ ,  $S_m = 0,0081$ , с КПД двигателя в номинальном режиме, при питании прямоугольными импульсами напряжения. Выберем форму питающего напряжения в виде прямоугольных импульсов. Для исследования влияния высших временных гармоник, примем амплитуду прямоугольного импульса такой, чтобы действующее значение первой гармоники напряжения было таким же, как действующее значение напряжения при чисто синусоидальном питании. Кривая представлена на рисунке 2.

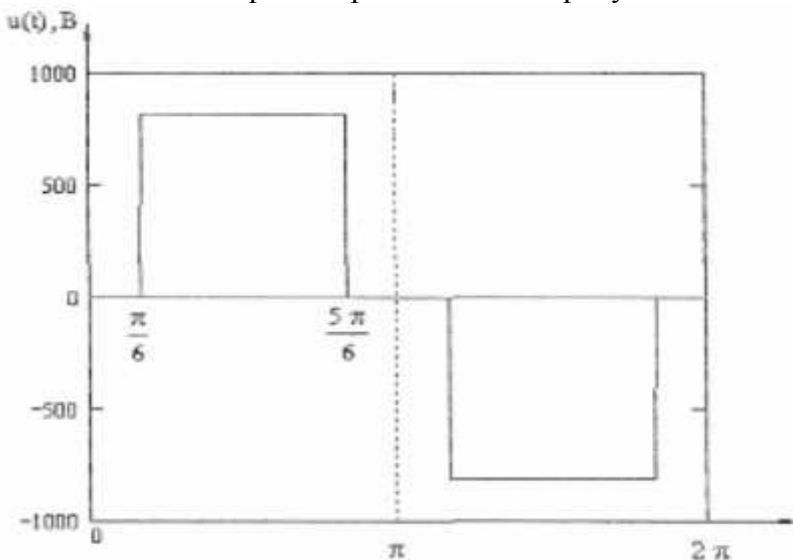


Рис. 2. Форма питающего напряжения

Так как положительная и отрицательная полуволны несинусоидального напряжения симметричны относительно оси абсцисс, четные высшие временные гармоники в кривой отсутствуют, т.е.  $K \neq 2 \cdot n$ , где  $n=1, 2, \dots$ . Кроме того, в симметричной трехфазной системе отсутствуют гармоники кратные трем  $K \neq 3 \cdot n$ , где  $n=1, 2, \dots$ , так как токи в любой момент времени совпадают по фазе и при соединении обмотки статора в звезду без нулевого провода существовать не могут. Чередование фаз пятой временной гармоники напряжения обратно чередованию фаз основной гармоники. Для седьмой временной гармоники напряжения оно совпадает с чередованием фаз основной гармоники. В общем виде высшие временные гармоники порядка

$$K = 2 \cdot m_1 \cdot n + 1,$$

где ( $m_1 = 3, n=1, 2, \dots$ ), чередование фаз и направление вращения электромагнитного поля, создаваемого ими, совпадает с основной гармоникой, называются высшими временными гармониками прямой последовательности, высшие временные гармоники порядка  $K = 2 \cdot m_1 \cdot n - 1$ , чередование фаз которых и направление вращения электромагнитного поля, создаваемого ими, противоположно основной гармонике, называются высшими временными гармониками обратной последовательности.

Согласно теории рядов Фурье найдем амплитуды векторов высших временных гармоник напряжения (рис. 3):

$$C_{1K} = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(K \cdot \omega \cdot t) dt,$$

$$C_{2K} = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(K \cdot \omega \cdot t) dt,$$

$$U'_{mK} = C_{2K} + C_{1K},$$

$$u(t) = \sum_K (|U'_{mK}| \cdot \cos(K \cdot \omega \cdot t + \arg(U'_{mK}))),$$

$$U_m(K) = U'_{mK}.$$

Магнитная цепь двигателя не является линейной, что учитывается зависимостью типа  $\Phi(I_0)$ , т.е. кривыми намагничивания. Для всех высших временных гармоник напряжения насыщения магнитной цепи машины определяются по основной гармонике магнитного потока как отношение МДС магнитной цепи к МДС воздушного зазора либо по данным испытаний на синусоидальном напряжении в режиме холостого хода. Влияние основного магнитного потока от высших временных гармоник напряжения на насыщение машины не учитывается по той причине, что скольжение  $S_k$  для них близки к единице. И поэтому основной поток машины от высших временных гармоник напряжения значительно меньше, чем от первой гармоники напряжения.

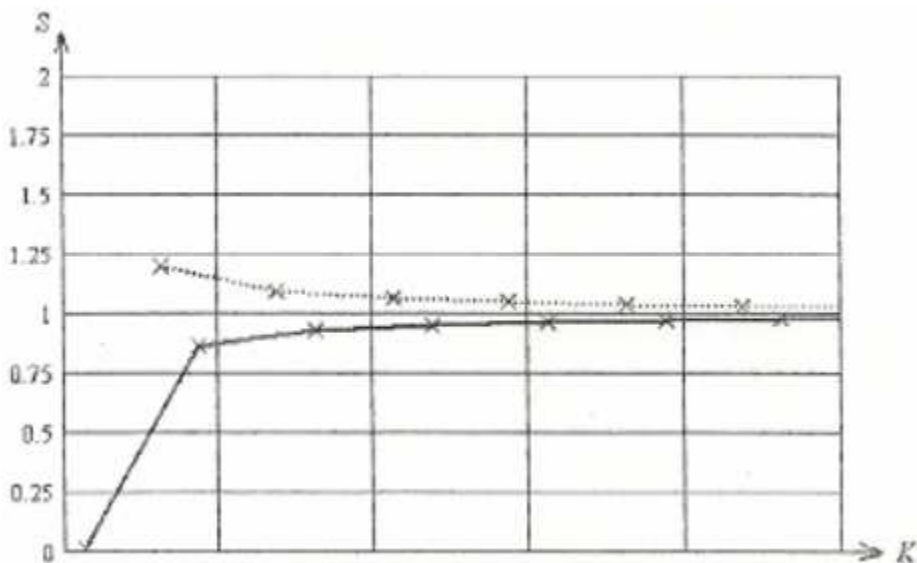


Рис. 3. Зависимость  $S$  от высших временных гармоник прямой (сплошная линия) и обратной (пунктирная линия) последовательности

Активное сопротивление схемы замещения, учитывающее потери в стали, определяется по выражению:

$$r_{\mu}(K) = \frac{8 \cdot m_1 \cdot (w_{\phi} \cdot k_{\sigma\sigma 1} \cdot \tau \cdot l_a)^2 \cdot f_1 \cdot K}{a(m_c + S(K) \cdot m_p) + b \cdot f_1 \cdot K \cdot [m_c + (S(K))^2 \cdot m_p]}, \text{ Ом},$$

где  $a$  и  $b$  – удельные потери в электрической стали активного сопротивления. Уменьшением индуктивности, связанной с тем же эффектом, пренебрегаем.

Эквивалентная глубина проникновения тока при поверхностном эффекте в статоре и роторе

$$\xi_1(K) = h_{np1} \cdot \sqrt{\frac{K \cdot \omega_1 \cdot \mu_0 \cdot \gamma_{Cu} \cdot b_{np1}}{b_{n1}}},$$

$$\xi_2(K) = h_{np2} \cdot \sqrt{\frac{K \cdot 2\pi \cdot S(K) \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \gamma_{Cu} \cdot b_{np2}}{b_{n2}}}.$$

При питании от инвертора кроме основной, присутствуют еще и высшие гармоники тока в обмотке статора и ротора, частота которых высока, что видно из таблицы 1. В этих условиях необходимо принимать во внимание эффект вытеснения тока, который учитывается коэффициентом увеличения сопротивления.

Коэффициент активного сопротивления стержня статора

$$\psi(\xi) = 2\xi \cdot \frac{\sinh(\xi) - \sin(\xi)}{\cosh(\xi) + \cos(\xi)},$$

$$\phi(\xi) = \xi \cdot \frac{\sinh(2\xi) + \sin(\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(\xi)},$$

$$K_{\Phi_1}(\xi) = \frac{\left[ \phi(\xi) + \left[ \frac{n_{\text{эл}1}^2 - 1}{3} - \frac{3(1-\beta)}{16} \cdot n_{\text{эл}1}^2 \right] \cdot \psi(\xi) \right] \cdot l_a + l_{\text{л}}}{l_a + l_{\text{л}}}.$$

Табл. 1.

№ гармоники	Потери в обмотке статора, Вт	Потери в обмотке ротора, Вт
1	6785	2997
5	624,6	2771
7	176,1	782,3
11	35,7	182,5
13	20,5	93,6
17	8,9	39,3
19	6,5	25,2
23	3,8	13,5
25	3,1	9,7
29	2,1	6,0
31	1,8	4,6
35	1,3	3,1
37	1,2	2,5

Коэффициент активного сопротивления стержня ротора

$$K_{\Phi_2}(\xi) = \phi(\xi) + \frac{n_{\text{эл}2}^2 - 1}{3} \cdot \psi(\xi).$$

Активное сопротивление обмотки статора с учетом поверхностного эффекта

$$r_1(K) = r_1 K_{\Phi_1}(\xi_1(K)).$$

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора с учетом поверхностного эффекта

$$r_2'(K) = r_2' K_{\Phi_2}(\xi_2(K)).$$

Ниже приведен комплексный метод расчета по Т-образной схеме замещения, откуда определяем рабочие и механические характеристики, а также КПД двигателя:

$$Z_1(K) = r_1(K) + i \cdot L_{\sigma 1} \cdot K \cdot \omega_1;$$

$$Z_{\mu}(K) = \frac{r_{\mu}(K) + i \cdot L_{r10}(I_{\mu}) \cdot K \cdot \omega_1}{r_{\mu}(K) + i \cdot L_{r10}(I_{\mu}) \cdot K \cdot \omega_1};$$

$$Z_2'(K) = \frac{r_2'(K)}{S(K)} + i \cdot L_{\sigma 2}' \cdot K \cdot \omega_1;$$

$$Z_{12}(K) = \frac{Z_2'(K) \cdot Z_{\mu}(K)}{Z_2'(K) + Z_{\mu}(K)};$$

$$Z(K) = Z_1(K) + Z_{12}(K);$$

$$I_1(K) = \frac{U_m(K)}{\sqrt{2}Z(K)};$$

$$E_{\mu}(K) = \frac{U_m(K)}{\sqrt{2}} - I_1(K) + Z_1(K); \quad I'_2(K) = \frac{E_{\mu}(K)}{Z'_{\mu}(K)};$$

$$I_{\mu}(K) = \frac{E_{\mu}(K)}{Z_{\mu}(K)}; \quad \phi(K) = \arg(Z(K)).$$

Потребляемая активная мощность:

$$P_1(K) = m_I \left| \frac{U_m(K)}{\sqrt{2}} \right| \cdot |I_1(K)| \cdot \cos(\phi(K)) - \text{активная мощность } K\text{-й}$$

гармоники;

$$P_{1\Sigma} = \sum_K P_1(K), \text{ Вт} - \text{полная мощность.}$$

Электрические потери в обмотках статора и ротора:

$$P_{\text{эл}1}(K) = m_I r_1(K) (|I_1(K)|)^2, \text{ Вт} - \text{потери в обмотке статора } K\text{-й}$$

гармоники;

$$P_{\text{эл}1\Sigma} = \sum_K P_{\text{эл}1}(K), \text{ Вт} - \text{полные потери в обмотке статора;}$$

$$P_{\text{эл}2}(K) = m_I r'_2(K) (|I'_2(K)|)^2, \text{ Вт} - \text{потери в обмотке ротора } K\text{-й}$$

гармоники;

$$P_{\text{эл}2\Sigma} = \sum_K P_{\text{эл}2}(K), \text{ Вт} - \text{полные потери в обмотке ротора.}$$

Основные потери в стали:

$$P_C(K) = m_I \operatorname{Re}(Z_{\mu}(K)) (|I_{\mu}(K)|)^2 - \text{потери в стали } K\text{-й гармоники;}$$

$$P_{C\Sigma} = \sum_K P_C(K), \text{ Вт} - \text{полные потери в стали.}$$

Добавочные потери:

$$P_{\text{доб}}(K) = 0,005 P_1(K), \text{ Вт} - \text{добавочные потери } K\text{-й гармоники;}$$

$$P_{\text{доб}\Sigma} = 0,005 P_{1\Sigma}, \text{ Вт} - \text{полные добавочные потери.}$$

Механические потери:

$$P_{\text{мех}} = 1100 \cdot \left( \frac{f_1}{15p} \right)^2, \text{ Вт.}$$

Тогда коэффициент полезного действия равен:

$$\eta_{\text{sin}} = 1 - \frac{P_{\text{эл}1}(1) + P_{\text{эл}2}(1) + P_C(1) + P_{\text{доб}}(1) + P_{\text{мех}}}{P_1(1)}.$$

Характеристики двигателя, рассчитанные для различных значений частоты питания с учетом высших временных гармоник, насыщения магнитной системы и поверхностного эффекта представлены на рисунке 4. При сравнительном анализе характеристик было выяснено, что снижение технико-экономических показателей за счет более точного учета физических явлений, происходящих при работе двигателя, составляет 1,38% по КПД и 1,7% по коэффициенту мощности.

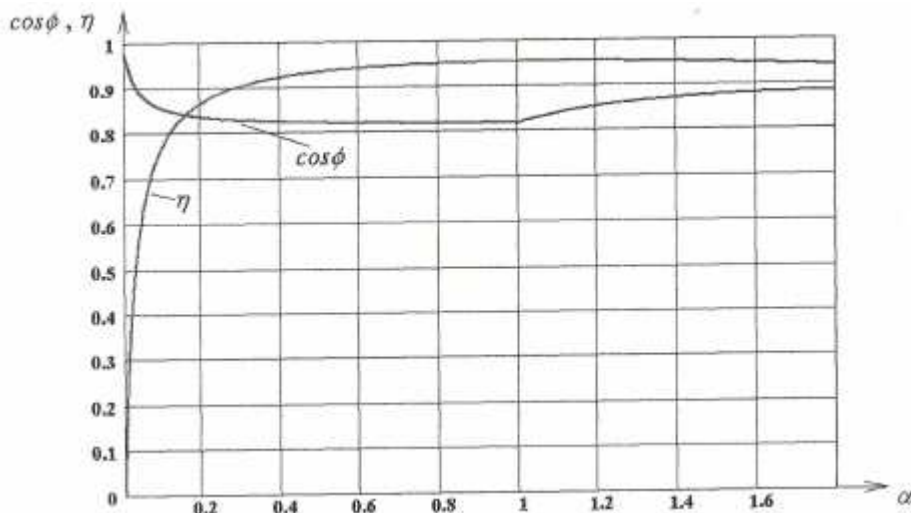


Рис. 4. Зависимость КПД и коэффициента мощности двигателя от относительной частоты питания

На основании проведенных расчетно-теоретических исследований был разработан алгоритм расчета характеристик тяговых асинхронных электродвигателей, который возможно использовать как элемент САПР. Для получения более точных результатов нужно использовать синтез цепных и полевых методик расчета, более точно подойти к учету добавочных потерь.

### Список литературы

1. Тяговые электродвигатели электровозов / В.И. Бочаров, В.И. Захаров, Л.Ф. Коломейцев, Г.И. Колпахчян, М.А. Комаровский, В.Г. Наймушин, В.И. Седов, И.И. Талья, В.Г. Щербаков, В.П. Янов; Под ред. В.Г. Щербакова. – Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. – 672 с.
2. Кучумов В.А. Исследование характеристик вращающего момента тягового асинхронного двигателя // Вестник ВНИИЖТ. 1982. №8. С. 29-32.
3. Персова М.Г. Математическая модель для исследования характеристик тягового асинхронного электродвигателя / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, З.С. Темлякова // Транспорт, наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2008. №6. С. 6-9.
4. Сорин Л.Н. Влияние отклонений характеристик асинхронных тяговых двигателей и систем их питания на величину момента // Электромеханика. 2004. №5. С. 35-40.
5. Уменьшение потерь электроэнергии в асинхронных тяговых электродвигателях при высокоскоростном движении путем оптимизации инвертора // Zev rail. Glasers Annalen. 2006. №12. С. 556-563.

### References

1. Bocharov V.I., Zakharov V.I., Kolomeitsev L.F., Kolpakhchyan G.I., Komarovskiy M.A., Naimushin V.G., Sedov V.I., Talya I.I., Shcherbakov V.G.,



- Yanov V.P. Traction motors of electric locomotives. – Novocherkassk, Agency Nautilus, 1998. – 672 p.
2. Kuchumov V.A. Research into the characteristics torque of the traction asynchronous motor // News of VNIIZhT. – 1982. – No. 8. – P. 29-32.
  3. Mathematical model for studying the characteristics of a traction asynchronous electric motor / M.G. Persova, Yu.G. Soloveychik, Z.S. Temlyakova // Transport, science, technology, management. Scientific information collection. – 2008. – No. 6. – P. 6-9.
  4. Sorin L.N. Influence of deviations in the characteristics of asynchronous traction motors and their power supply systems on the magnitude of the moment // Electromechanics. – 2004. – No. 5. – P. 35-40.
  5. Reducing power losses in asynchronous traction motors during high-speed movement by optimizing the inverter // Zev rail. Glasers Annalen. – 2006. – No.12. – P. 556-563.

<b>Петухов Сергей Васильевич</b> – кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой электроэнергетики и электротехники	<b>Petukhov Sergey Vasilyevich</b> – candidate of technical sciences, associate professor, acting head of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering
<b>Кришьянис Майя Волдемаровна</b> – старший преподаватель кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Krishyanis Maya Voldemarovna</b> – senior lecturer of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering
<b>Баланцева Наталья Борисовна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Balantseva Natalia Borisovna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Electric Power and Electrical Engineering
<b>Бутаков Сергей Владимирович</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Butakov Sergey Vladimirovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Electric Power and Electrical Engineering
<b>Хвиюзов Михаил Андреевич</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Khviyuzov Mikhail Andreevich</b> - candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Electric Power and Electrical Engineering
<b>Калиничева Оксана Александровна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Kalinicheva Oksana Alexandrovna</b> - candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Electric Power and Electrical Engineering
krishjyanis@narfu.ru	

Received 08.02.2022