

УДК (UDC) 621.314

## ASYNCHRONOUS PHASE ROTOR GENERATORS FOR POWER PLANES OPERATING PARALLEL WITH A NETWORK

Алимходжаев Ш.К.<sup>1</sup>, Захидов О.У.<sup>1</sup>, Таниев М.Х.<sup>1</sup>  
 Alimkhodjaev Sh.K.<sup>1</sup>, Zakhidov O.U.<sup>1</sup>, Taniev M.H.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова  
 (Ташкент, Узбекистан)

<sup>1</sup> - Tashkent state technical university named after Islam Karimov (Tashkent, Uzbekistan)

**Abstract:** The article presents the results of studies of asynchronous generators of wind power plants and small hydroelectric power stations operating in parallel with the electric network. The parameters of the equivalent circuit are specified, on the basis of which the analytical dependence of the electromagnetic moment of the generator is found. It is proposed to take into account the revealed features of the mechanical characteristics of the generators that differ from the characteristics determined by the generally accepted analytical method.

**Key words:** asynchronous generator, electromagnetic moment, mechanical characteristics, equivalent circuits, energy carrier, stator windings, rotor, frequency controllers, inductive dissipation resistance, electromotive force.

## АСИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ

**Аннотация:** В статье приведены результаты исследований асинхронных генераторов ветряных электростанций и малых ГЭС, работающих параллельно с электрической сетью. Уточняются параметры схемы замещения, на основе которых находится аналитическая зависимость электромагнитного момента генератора. Предлагается учитывать выявленные особенности механических характеристик генераторов, отличающихся от характеристик, определяемых общепринятым аналитическим методом.

**Ключевые слова:** асинхронный генератор, электромагнитный момент, механические характеристики, схемы замещения, энергоноситель, обмотки статора, ротор, регуляторы частоты, индуктивные сопротивления рассеяния, электродвижущая сила.

Известно, что в Узбекистане производство электроэнергии в основном осуществляется на тепловых электростанциях, путем сжигания органического топлива. Немногим известно, что для получения 1 кВт·ч электрической энергии расходуется 0,3 кубического метра природного газа, или в среднем 2,5 кг угля [4], разведанные подземные запасы которых не бесконечны. Электростанции с возобновляемым источником энергии (ВИЭ) - гидравлические электростанции (ГЭС) - вырабатывают не более 10% от общего производства электроэнергии в стране.

В последние годы в сфере науки и производства заметна активизация поиска путей использования ВИЭ в производстве электроэнергии. Так, например, немецким консорциумом компаний «Inter Gora» и «Geonet» на территории Узбекистана проводились замеры параметров ветра, которые показали, что ветроэнергетический потенциал Узбекистана составляет свыше 512 ГВт [5]. Это дает возможность построить тысячи ветряных электростанций (ВЭС), позволяющих производить электроэнергию в объеме в десятки раз превышающем сегодняшний уровень. По данным исследований немецкой компании «Fichtner», гидроэнергетический потенциал малых горных рек Узбекистана составляет более 4 ГВт. При

наличии такого большого потенциала ВИЭ, население отдаленных от центра районов страны ощущают нехватку электроэнергии. Необходимо отметить, что одним из основных направлений стратегии развития Узбекистана на ближайшие годы является улучшение социального положения населения отдаленных районов, главным препятствием которому является нехватка электроэнергии. В этой связи на сегодняшний день вопросы внедрения ВИЭ - преобразование солнечной, ветряной энергии и энергии малых рек являются актуальными для нашей страны. Потребность в электроэнергии растет день за днем в связи с планированием на ближайшие годы строительства энергоемких предприятий в машиностроении, металлургии, горнодобывающей, перерабатывающей, текстильной, легкой промышленности и на транспорте.

Постановлением Президента Республики Узбекистан № ПП-3012 от 26.05.2017 г. к 2021 году вблизи города Нукус будет построена ВЭС мощностью 100 МВт. Также, аналогичная электростанция, мощность которой составляет 200 МВт, строится вблизи города Зарафшан [5]. В соответствие с этим Постановлением к 2021 году будут модернизированы старые и построены новые малые ГЭС суммарной мощностью 600 МВт.

На предприятиях стран с развитой экономикой освоено серийное производство малых ГЭС (мини-ГЭС – до 2 МВт и микро-ГЭС – до 0,2 МВт) и ВЭС с синхронным генератором [1,6]. Использование синхронных генераторов к дешевым мини- и микро ГЭС, которые рекомендуются к внедрению в малых горных реках Узбекистана и ВЭС с часто меняющимися техническими параметрами потоков воды и ветра не целесообразно с точки зрения необходимости наличия регуляторов частоты, поддерживающих постоянную частоту выходного напряжения. Поэтому, их используют, в основном для автономного режима работы ГЭС и ВЭС. Включение в параллельную работу с сетью мини-, микро-ГЭС и ВЭС сопряжено с трудностями синхронизации генератора с сетью и значительным удорожанием оборудования за счет сложных, дорогих систем регулирования скорости вращения ротора при колебаниях параметров энергоносителя (скорости ветра и потока воды).

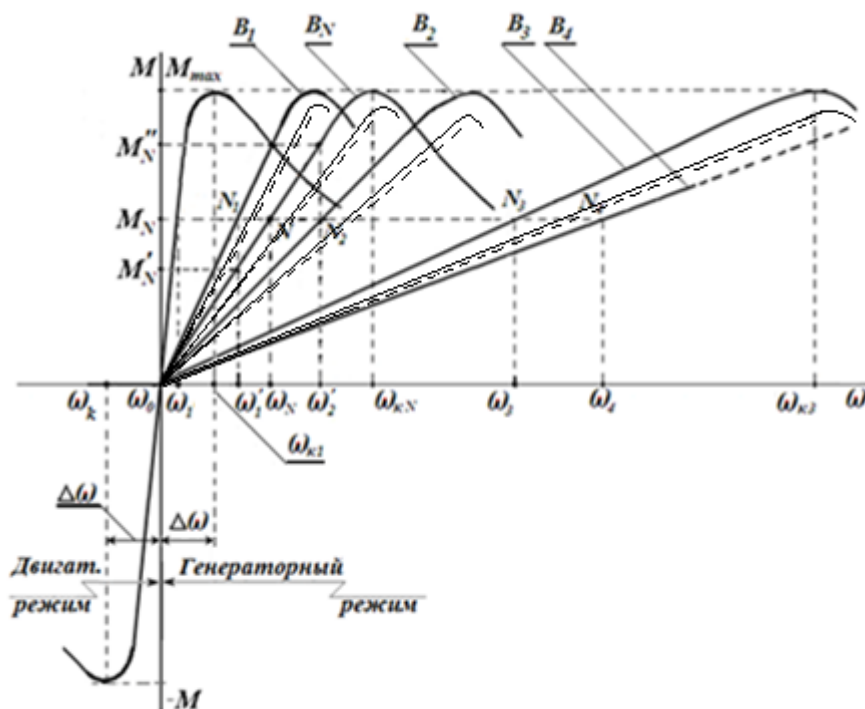
Использование в качестве генератора серийно выпускаемых асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором [8], для приведенных выше электростанций с переменными параметрами энергоносителя и работающих параллельно с действующей сетью, также не целесообразно в связи с тем, что рабочий диапазон скорости вращения ротора такого двигателя ограничен узкой полосой, характеризуемой отрезком между режимом холостого хода и максимальным электромагнитным моментом (рис. 1 отрезок  $\Delta\omega = \omega_0\omega_{k2}$  - рабочая зона). Следовательно, за пределами диапазона скоростей ротора асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором при изменениях параметров первичного энергоносителя в генераторном режиме не возможно.

На рис.1 механические характеристики построены на основе классической теории асинхронных двигателей [2,3]. Применение асинхронного генератора с фазным ротором в таких электрических станциях приведет не только к расширению рабочего диапазона скорости вращения ротора в десятки раз (на рис.1 отрезок  $\Delta\omega_3 = \omega_0\omega_{k3}$ ), тем самым к надежной их эксплуатации, но и упрощению процесса их изготовления и эксплуатации, позволяет поддерживать неизменную выходную мощность генератора, при колебании параметров энергоносителя и упростить процесс включения в параллельную работу с сетью [7]. Освоение в нашей стране промышленного производства установок мини-, микро-ГЭС и ВЭС на основе асинхронного генератора с фазным ротором и их массовой эксплуатации позволит не только использовать гидроэнергетический потенциал малых горных рек и ветра, но и обеспечить электроэнергией отдаленные населенные пункты, надежно (предсказуемо) передавать излишнюю электроэнергию в электрическую сеть и открывать тысячи новых рабочих мест.

Известно, что асинхронные машины, в основном, используются в режиме двигателя [2], поэтому в научной литературе теория асинхронных машин изложена, в основном для двигательного режима.

Исследованию генераторного режима уделяется мало внимания, при этом считается, что принятые допущения для двигательного режима приемлемы для генераторного режима тоже, и отправной точкой при изложении отдельных теоретических положений асинхронного

генератора принимается его работа в двигательном режиме [3]. Так, например, при определении постоянных параметров асинхронного двигателя исходят из того, что диапазон изменения скольжения вращения ротора невелик и равен отрезку механической характеристики от точки холостого хода до точки критического скольжения  $\omega_0 \omega_{k2}$  с максимальным моментом.



**Рисунок 1. Механические характеристики асинхронной машины**

В генераторном режиме, из-за широкого диапазона изменения параметров первичного энергоносителя, для обеспечения надежной работы электростанции скорость вращения ротора также должна изменяться в достаточно широком диапазоне (на рис.1 отрезок  $\Delta\omega_3 = \omega_0 \omega_{k3}$ ). Поэтому, построенные при помощи аналитических методов механические характеристики асинхронного генератора, значительно отличаются от характеристик, построенных с помощью данных эксперимента. Исходя из этих соображений, общепринятые допущения о том, что параметры электрической схемы замещения асинхронной машины являются постоянными, для генераторного режима являются неприемлемыми. Например, из-за изменения частоты тока в обмотке ротора в широком диапазоне, индуктивное сопротивление рассеяния ротора  $x_2 = 2\pi f_2 \cdot L_2 = x_2(s)$  не будет постоянной величиной.

Целью данной работы является определение аналитической зависимости механической характеристики асинхронного генератора  $M = f(\omega)$  путем анализа отличительных особенностей схем замещения при различных режимах работы, связанных с изменениями параметров первичного энергоносителя и самой асинхронной машины. При этом при исследовании физических процессов, происходящих в асинхронном генераторе, упрощении вывода аналитической зависимости электромагнитного момента с использованием разработанной схемы замещения АГ, примем общепринятые допущения о том, что вместо реальной асинхронной машины рассматриваем идеализированную машину. Кроме этого, будем учитывать то обстоятельство, что поток энергии асинхронного генератора направлен от

ротора к статору. Поэтому параметры и переменные ротора будем считать первичными и обозначим индексом « 1 », а статора - вторичным и обозначим индексом « 2 ».

Известно, что теория асинхронных машин основана на подобию электромагнитных процессов асинхронных машин и трансформаторов. Исходя из этого, составляется система уравнений напряжений и токов статора и ротора, строится схема замещения, определяются аналитическое выражение электромагнитного момента и механических характеристик. При этом, также как в трансформаторах, необходимо параметры обмотки ротора привести к параметрам обмотки статора путем введения соответствующих коэффициентов приведения.

В процессе вывода схемы замещения асинхронного генератора необходимо учитывать то обстоятельство, что поток активной мощности в отличие от двигательного режима, направлен от ротора к статору, а реактивная мощность, на оборот - от сети (или от компенсирующего конденсатора на зажимах статорной обмотки) к обмотке статора. Считаем, что сохраняется неизменной МДС приведенной обмотки ротора и реальной, получим приведенный ток обмотки ротора

$$\dot{I}'_1 = \dot{I}_1 \frac{m_1 w_1 k_{01}}{m_2 w_2 k_{02}} = \dot{I}_1 k_I, \quad (1)$$

где  $m_1, m_2$  – числа фаз обмоток ротора и статора;  $w_1, w_2$  – числа фаз обмоток ротора и статора;  $k_{01}, k_{02}$  – обмоточные коэффициенты обмоток ротора и статора.

Также считаем, что магнитный поток в машине с приведенным числом витков обмотки и с действительным числом витков не изменится [2,3]

$$\Phi_m = \frac{\dot{E}_1}{4,44 w_1 k_{01} f_2} = \frac{\dot{E}'_1}{4,44 w_2 k_{02} f_2}, \quad (2)$$

получим

$$\dot{E}'_1 = \dot{E}_1 \frac{w_2 k_{02}}{w_1 k_{01}}. \quad (3)$$

Из условий сохранения потерь в роторе

$$m_1 I_1^2 r_1 = m_2 (I'_1)^2 r'_1 \quad (4)$$

находим приведенное активное сопротивление обмотки ротора

$$r'_1 = \frac{I_1^2 m_1}{(I'_1)^2 m_2} r_1 = \left( \frac{m_2 w_2 k_{02}}{m_1 w_1 k_{01}} \right)^2 \frac{m_1}{m_2} r_1. \quad (5)$$

Из условия неизменности реактивной мощности получим приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора

$$x'_1 = \frac{r'_1}{r_2} x_1 = x_1 \frac{m_1}{m_2} \left( \frac{w_2 k_{02}}{w_1 k_{01}} \right)^2. \quad (6)$$

Таким образом, можно показать коэффициенты приведения для тока ротора из (1)

$$k_I = \frac{m_1 w_1 k_{01}}{m_2 w_2 k_{02}}, \quad (7)$$

коэффициент приведения для напряжения и ЭДС из (3)

$$k_U = \frac{w_2 k_{02}}{w_1 k_{01}}, \quad (8)$$

и коэффициент приведения для активного и индуктивного сопротивлений ротора из (5) и (6)

$$k_Z = \frac{k_U}{k_I} = \frac{m_2 (w_2 k_{02})^2}{m_1 (w_1 k_{01})^2}. \quad (9)$$

Из теории трансформаторов и асинхронных двигателей известно, что согласно закону полного тока магнитный поток  $\Phi$  создается совместным действием МДС обеих обмоток. Если считать, что токи изменяются по синусоидальному закону, то можно записать

$$\dot{I}_2 m_2 w_2 k_{02} + \dot{I}_1 m_1 w_1 k_{01} = \dot{I}_0 m_2 w_2 k_{02} \quad (10)$$

тогда, используя коэффициент приведения тока можно заменить  $I'_1 = I_1 (m_1 w_1 k_{01} / m_2 w_2 k_{02})$  и получить уравнение токов

$$\dot{I}_2 + \dot{I}'_1 = \dot{I}_0 \quad (11)$$

где  $I_0$  - ток намагничивания.

Такое уравнение справедливо для трансформатора и асинхронной машины с неподвижным ротором, в которых частота тока равны. В асинхронном генераторе при вращении ротора частота тока вторичной обмотки отличается на порядок. В литературе, хотя и представлен метод приведения амплитудных значений тока и ЭДС обмотки ротора к току и ЭДС обмотки статора, информация о приведении аргументов этих функций не представлена. По этой причине представленная на рис.2,а Т-образная схема замещения асинхронной машины, построенная на подобии трансформаторов, на практике не нашла применения.

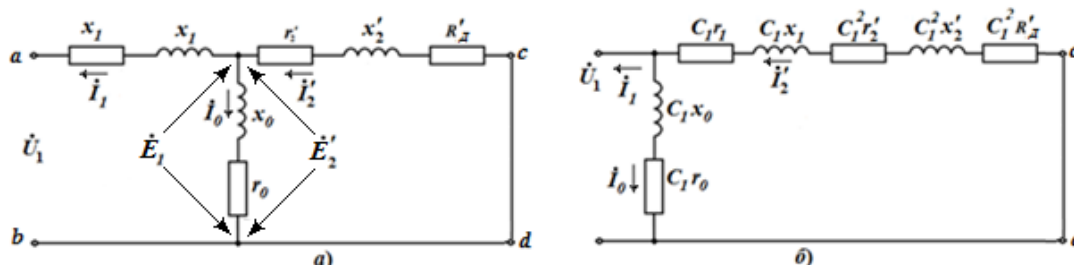


Рисунок 2. Т-образная (а) и Г-образная (б) схемы замещения асинхронного генератора

В асинхронном генераторе при изменении частоты вращения ротора аналитическая зависимость, связывающая частот тока и ЭДС статора и ротора, будет  $f_1 = f_2 s$ . Поэтому, считая магнитный поток неизменным, можно записать связь между ЭДС обмоток статора и ротора

$$E_2 = E'_1 = 444 f_1 w_1 k_{01} \Phi_m. \quad (12)$$

Подставив значение частоты  $f_1 = f_2 s$  в (12), получим приведенный ток в роторе генератора с учетом приведения аргумента тока

$$\dot{I}'_1 = \frac{\dot{E}'_{1s}}{z'_{1s}} = \frac{s \cdot \dot{E}'_1}{r'_1 + R_D + js \cdot x'_1}, \quad (13)$$

где  $z'_{2s} = r'_2 + R_D + js \cdot x'_2$

является полным приведенным сопротивлением роторной цепи к статорной цепи с учетом приведения, как по амплитуде, так и по аргументу тока.

Тогда в расчетах можно будет использовать Г-образную схему замещения асинхронного генератора (рис.2,б). В схеме замещения величина

$$\dot{C}_1 = \frac{(r_2 + jx_2) + (r_0 + jx_0)}{r_0 + jx_0} \quad (14)$$

является комплексным коэффициентом.

Электромагнитный момент асинхронного генератора создается в результате взаимодействия тока обмотки ротора с вращающимся магнитным потоком. В установившемся

режиме, когда скорость вращения ротора неизменна  $n = const.$ , приложенная к валу мощность турбины  $P_1$  уравнивается электромагнитным моментом  $M$ , который является моментом сопротивления и развивается асинхронным генератором. Вывод аналитического выражения электромагнитного момента в функции скольжения  $M(s)$  можно осуществить несколькими способами, по одному из которых можно определить, если известна механическая мощность  $P_1$  турбины или электрические потери в роторе  $P_{эл.1} = s \cdot P_1$

$$M = \frac{P_1}{\omega_c} = \frac{P_{эл.1}}{s\omega_c} = \frac{m_1 r_1' (I_1')^2}{s\omega_c}, \quad (15)$$

где  $\omega_c$  - синхронная угловая скорость вращающего магнитного потока машины. Из Г-образной схемы замещения определяем ток ротора, приведенный к статору

$$I_1' = \frac{U_2}{\sqrt{\left[ c_1 \frac{r_1'}{s} + c_1 R_D + r_2 \right]^2 + [x_2 + c_1 x_1'(s)]^2}}. \quad (16)$$

Подставив (16) в уравнение (15), определим

$$M = \frac{m_1 U_2^2 r_1'}{s\omega_c \left[ \left[ c_1 \frac{r_1'}{s} + c_1 R_D + r_2 \right]^2 + [x_2 + c_1 x_1'(s)]^2 \right]} \quad (17)$$

Таким образом, в асинхронном генераторе, в отличие от двигательного режима, аналитическая зависимость электромагнитного момента имеет индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, существенно изменяющееся при изменениях скольжения, из-за изменения частоты тока ротора. Кроме этого, добавочное сопротивление в цепи ротора  $R_D$ , входящее в знаменатель уравнения (17) приводит к уменьшению величины электромагнитного момента.

Для определения максимального момента и критического скольжения, соответствующего этому максимуму, проведем математический анализ функции (17). Для этого принято предположение о том, что все величины в (17) являются постоянными, кроме  $M$  и  $s$ , хотя знаем, что индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора зависит от частоты скольжения. Тогда, приравняв к нулю производную от момента по скольжению, находим критическое скольжение  $s_k$ , и максимальный момент, которые отличаются от подобных функций двигательного режима только наличием переменной величины  $x_1'(s)$ .

Таким образом, механические характеристики асинхронного генератора, построенные по выведенной аналитической зависимости (17) (тонкие линии на рис.1) близки к совпадению с кривыми, построенными по данным эксперимента (прерывистые линии). Однако характеристики, рассчитанные по приближенной методике - без учета зависимости  $x_2'(s)$ , значительно расходятся от опытных характеристик (толстые линии на рис.1).

Для определения достоверных расчетов искомых кривых, проводились исследования по анализу функции (17) с помощью математической модели и с использованием вычислительной программы «Матлаб». Сравнения решения зависимости (17) с учетом переменного индуктивного сопротивления рассеяния на ПК при различных постоянных величинах добавочного сопротивления с экспериментально снятыми механическими характеристиками

асинхронного генератора показали их сходство. Погрешность составила не более 5%. В качестве объекта исследования принят асинхронный двигатель, мощностью 2,2 кВт, синхронной скоростью 1000 об/мин., серии МТФ012-6.

**Заключение.** Построенная Г-образная схема асинхронного генератора, хотя по структуре похожа на подобную схему замещения двигательного режима, однако она существенно отличается тем, что индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки не является постоянной при широком изменении параметров первичного источника энергии.

Из-за того, что индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки является функцией частоты тока ротора, которая должна изменяться в большом диапазоне, опытные механические характеристики асинхронного генератора значительно отличаются от механических характеристик, построенных известным методом.

Механические характеристики, построенные по предложенной аналитической зависимости электромагнитного момента, незначительно отличаются от экспериментально снятых характеристик.

### Литература

1. Безруких П.П. Ветроэнергетика. Изд. «Энергия», М.: 2010, 320 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины. Учеб. для вузов. 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 607 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. - Л., изд-во «Энергия». 1978. 832 с.
4. Вблизи городов Нукус и Зарафшан будут построены ветряные электростанции. [Электронный ресурс]. -Режим доступа: <https://kun.uz/ru/news/2019/09/02/vblizi-gorodov-nukus-i-zarafshan-budut-postroyeny-vetryanyye-elektrostansii> (date of the application: 02.09.2019).
5. Захидов Р.А., Кремков М.В. Потенциал ветровой энергетики Узбекистана // *Гелиотехника*. 2015. -№4. -с. 111-112.
6. Аллаев К.Р. Потенциал эффективных альтернативных источников энергии в Узбекской Республике // *Проблемы энерго- и ресурсосбережения*. 2015. - № 4. –С. 6-12.
7. Алимходжаев Ш.К. Управляемая ветроэлектроустановка, работающая параллельно с действующей сетью: Пат. IAP 05781. РУз. - 2019.
8. Пантелеева Л.А. Повышение эффективности работы асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором: автореф. дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. - Ижевск. 2012. - 24 с.

### References

1. Bezrukikh P.P. Wind power. Ed. "Energy", Moscow: 2010, 320 p.
2. Kopilov I.P. Electric Machines. Textbook for universities. 3rd ed., Rev. - M.: Higher. school, 2002. -- 607 p.
3. Voldek A.I. Electric cars. - L., publishing house "Energy". 1978. 832 p.
4. Wind farms will be built near the cities of Nukus and Zarafshan. Kun.uz. from 09/02/2019. [Electronic resource] -Access mode <https://kun.uz/ru/news/2019/09/02/vblizi-gorodov-nukus-i-zarafshan-budut-postroyeny-vetryanyye-elektrostansii>
5. Zakhidov R.A., Kremkov M.B. Potential of wind power energy of Uzbekistan // *Gelioteknikal*/ 2015. - № 4. P. 111-112.
6. Allaev K.R. The potential of effective alternative energy sources in the Uzbek Republic. // *Problems of energy and resource conservation*. No. 4, 2015. Tashkent.
7. Alimhodzhaev Sh. Managed wind turbine operating in parallel with the existing network. Patent of the Republic of Uzbekistan. IAP 05781. Bull., No. 3 dated 03/29/2019.
8. Panteleeva L.A. Improving the efficiency of an asynchronous squirrel-cage generator. Abstract. diss. for a job. student Art. Ph.D. - Izhevsk. 2012.

### Сведения об авторах / Information about the authors

**Алимходжаев Шарафиддин Камалиддинович** - открытое акционерное общество «Global Textile Solutions», главный инженер, соискатель кафедры «Электрические машины, Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова. E-mail: [k.alimhodjaev@mail.ru](mailto:k.alimhodjaev@mail.ru)

**Захидов Одил Умирзакович** - Старший преподаватель Навоийского горного института, соискатель кафедры «Электрические машины», Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова.

**Таниев Мирзохид Хуррамович** - Старший преподаватель и соискатель кафедры «Электрические машины», Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова.

**Alimhodzhaev Sharafiddin Kamaliddinovich** - Joint Stock Company «Global Textile Solutions», Chief Engineer, and Applicant, Department of «Electric Machines», Tashkent State technical university named after Islam Karimov. E-mail: [k.alimxodjaev@mail.ru](mailto:k.alimxodjaev@mail.ru)

**Zakhidov Odil Umirzakovich** - Senior Lecturer, Navoi Institute of Mines, Applicant, Department of «Electrical Machines», Tashkent State technical university named after Islam Karimov.

**Taniev Mirzohid Hurramovich** - Senior Lecturer and Applicant of the Department of «Electric Machines», Tashkent State technical university named after Islam Karimov.