

УДК 621.313.333

ГРНТИ 44.29.31

DOI 10.56525/DETK2355

АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМАХ ДВИГАТЕЛЯ-ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Ю.М. Бобожонов, Б.Т. Сеитмуратов, Т.Т. Берданов

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха, Нукус, Узбекистан

e-mail: b_yunus@karsu.uz, s_bayram@karsu.uz, t_berdanov@karsu.uz

Аннотация. Как известно, в связи с этим на производственных предприятиях в регионах в ходе реализации ряда указов и постановлений, принятых Президентом Республики и Кабинетом Министров в 2024–2026 годах, В бюджетных учреждениях и среди бытовых потребителей ускоренными темпами проводилась установка солнечных батарей и строительство микро-ГЭС. Кроме того, за последние несколько лет иностранные инвесторы построили и ввели в эксплуатацию крупные ветровые электростанции. В результате была прекращена полная зависимость страны от традиционных электростанций и сокращено потребление электроэнергии, производимой тепловыми электростанциями, что обеспечило значительную экономию энергетических ресурсов.

Исследования показывают, что в генераторных установках ВЭС и ГЭС используются синхронные генераторы (СГ) и асинхронные генераторы (АГ) с фазовыми обмотками и короткозамкнутыми роторами. Подключение конденсаторных батарей к обмоткам статора позволяет обеспечить самозапуск АГ в магнитном проводнике благодаря его остаточной намагниченности и выполнить такие требования, как стабильность выходного напряжения. Предлагаемый метод возбуждения на основе конденсаторов является децентрализованным, что позволяет генераторному агрегату адаптировать свои режимы работы в условиях автономного энергоснабжения. В данной статье на основе результатов проведенного эксперимента получены и проанализированы осциллограммы, отражающие значения выходного напряжения в переходных процессах АГ с короткозамкнутым ротором мощностью 4 кВт.

Ключевые слова: АГ с короткозамкнутым ротором с самовозбуждением, механическая характеристика, схема замещения.

Введение

В большинстве случаев асинхронного двигателя используются в режиме АД, и только в некоторых случаях в режимах асинхронного генератора (АГ). При анализе их характеристик используются схемы замещения, а их параметры определяются экспериментальными исследованиями и служат основой для расчета крутящего момента, тока, мощности и устойчивости. В режиме АГ знак скольжения отрицательный, и когда ротор приводится в движение каким-либо первичным двигателем, он начинает передавать активную мощность в сеть. Целью работы является экспериментальное определение параметров эквивалентной схемы конкретной машины и анализ ее механической характеристики путем оценки условий устойчивой нагрузки в широких пределах скольжения, в том числе в режиме генератора, при критических значениях момента [1].

Методы и результаты

Для теоретического исследования был выбран серийно выпускаемый асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа АИМЛ71В4УЗ, имеющий следующие номинальные данные:

- мощность 0,75 кВт,
- напряжение 380/220 В,

- ток 2,05/3,56 А,
- частоту вращения 1395 об/мин,
- коэффициент полезного действия 74%,
- $\cos\varphi = 0,75$.

Для теоретического исследования параметры схемы замещения (на рис. 1) асинхронной машины АИМЛ71В4УЗ были определены известными методами. Активное сопротивление обмотки статора было определено с использованием амперметра и вольтметра при питании постоянным током. Измерения сопротивления фаз проводились при трех разных значениях напряжения при температуре окружающей среды 20°C. Среднее значение активного сопротивления трех фаз составило 8,59 Ом. Измеренное сопротивление фазы было приведено к температуре 75°C по формуле:

$$R_{75} = R_{cp} \cdot [1 + 0,004 \cdot (75 - 20)] \quad (1)$$

где 0,004 1/S - температурный коэффициент сопротивления для меди.

Параметры цепи намагничивания схемы замещения были определены по результатам опыта холостого хода асинхронного двигателя, который проводился при номинальном напряжении фазы $U_{фн}=220В$. Были измерены потребляемая активная мощность и ток фазы. Получены следующие средние значения входных сопротивлений фаз.

$$Z_0 = \frac{220}{1,4} = 157,1 \text{ ом- полное фазное сопротивление,}$$

$$R_0 = \frac{153}{3 \cdot 1,4^2} = 26 \text{ Ом- активное сопротивление фазы,}$$

$$X_0 = \sqrt{157,1^2 - 26^2} = 154,9 \text{ Ом- индуктивное сопротивление фазы.}$$

Проведен опыт короткого замыкания при пониженном напряжении, подведенном к статору асинхронного двигателя АИМЛ71В4УЗ. Были измерены напряжение фазы $U_{фк}$, ток фазы $I_{фк}$ и мощность, потребляемая из сети всей машины P_k . По опытным данным были определены входные сопротивления фазы в режиме короткого замыкания:

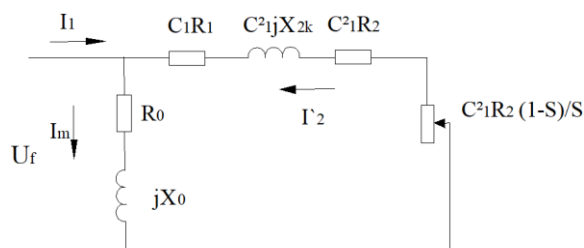
$$Z_{фк}=27,22 \text{ Ом, } R_k=19,28 \text{ Ом, } X_{2k}=19,21 \text{ Ом, } X_1=X'_2=19,21/2=9,61 \text{ Ом,}$$

$$R'_2 = R_{pk} - R_{75} = 19,28 - 10,48 = 8,8 \text{ Ом.}$$

При переходе от «Т» - образной схемы к «Г» - образной схеме модуль коэффициента приведения сопротивления обмотки ротора определен по формуле:

$$C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_M} = 1 + \frac{9,61}{154,9} = 1,06 \quad (2)$$

«Г»-образная схема одной фазы асинхронной машины представлена на рис.1.



1-рисунок. Схема замещения асинхронной машины после объединения выше указанных сопротивлений

- $C_1 \cdot R_1 = 1,06 \cdot 10,48 = 11,1 \text{ Ом}$
- $C_1^2 \cdot R_2 = 1,06^2 \cdot 8,8 = 9,89 \text{ Ом,}$

- с) $(R_1 + R_M) = R_0 = 26 \text{ Ом}$,
- д) $(X_1 + X_M) = X_0 = 154,9 \text{ Ом}$,
- е) $C_1^2 \cdot X_{2k} = 1,06^2 \cdot 19,21 = 21,58 \text{ Ом}$,

Схема замещения, изображенная на 1-рисунке обозначенные ее параметры R_0 , X_0 , R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , приняты для расчета и анализа механических характеристик асинхронного генератора, постоянными, независимыми от скольжения ротора [2].

Механическая характеристика асинхронной машины

Известно, что зависимость электромагнитного момента $M_{эм}$ определяется формулой применительно к схеме замещения, изображенной на рис.1:

$$M_{эм} = \frac{m \cdot p \cdot U_f^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\omega_1 \left[(R_1 + C_1 \cdot \frac{R_2}{s})^2 + C_1^2 \cdot X_{2k}^2 \right]} \quad (3)$$

где $m=3$ - число фаз асинхронной машины;

$p=2$ - число пар полюсов для асинхронной машины АИМЛ71В4У3;

$U_\phi=220 \text{ В}$ - номинальное фазное напряжение;

$R_2=8,80 \text{ Ом}$ - активное сопротивление обмотки ротора;

$\omega_1=2\pi f=2 \cdot 3,14 \cdot 50=3,14$ - угловая частота при частоте сети $f=50 \text{ Гц}$;

$R_1=10,48 \text{ Ом}$ - активное сопротивление обмотки статора;

$X_{2k}=19,21 \text{ Ом}$ - индуктивное сопротивление обмотки ротора;

$C_1=1,06$ - модуль коэффициента приведения параметров статора к цепи ротора Г-образной схемы замещения [3].

Таблица 1. Результаты расчета электромагнитного момента АД модели АИМЛ71В4У3

В режиме двигателя									
$S_{отн.ед}$	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
$M_{эм}, \text{ Н} \cdot \text{М}$	5,16	6,83	10,50	12,15	12,65	12,55	12,17	11,10	10,0
В режиме генератора									
$S_{отн.ед}$	-0,07	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-1,0
$M_{эм}, \text{ Н} \cdot \text{М}$	-6,94	-10,36	-22,07	-30,81	-34,24	-33,57	-31,00	-24,90	-20,02

Для сравнения проведен расчет номинальных данных.

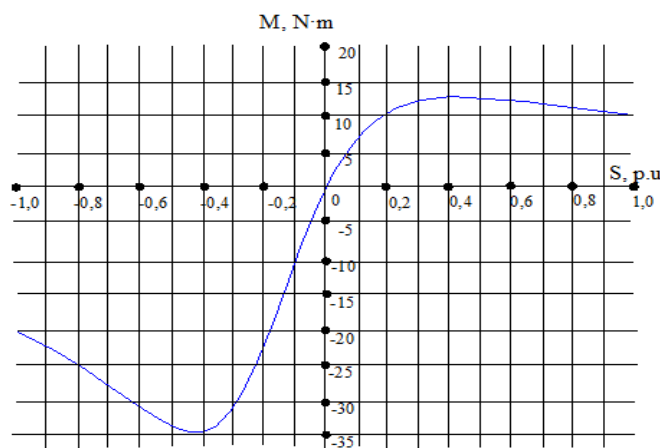
Скольжение в номинальном режиме асинхронного двигателя определяется:

$$S_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0,07 \quad (4)$$

Момент ротора в номинальном режиме определяется:

$$M_n = \frac{9550 \cdot P_n}{n_n} = \frac{9550 \cdot 0,75}{1395} = 5,13 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5)$$

По расчетным данным таблицы 1 построен график механических характеристики асинхронной машины, представленный на рисунке 2.



2- рисунок. Расчетная механическая характеристика асинхронной машины АИМЛ71В4У3

Режим двигателя соответствует изменению скольжения от нуля до единицы, а режим генератор - от нуля до минус бесконечности. Однако, для практического использования представляют интерес характеристики генератора только в пределах изменения скольжения от нуля до минус единицы, что и отражено на рис.2 [3].

Результаты и обсуждение

Механическая характеристика имеет критические значения момента как в режиме двигателя $+M_{кр}$, так и в режиме генератора $-M_{кр}$. Поэтому нагрузка асинхронной машины возможна в пределах $\pm M_{кр}$.

Критические значения скольжения $S_{кр}$ и момента $M_{кр}$ определяются по формулам (6, 7) имеют следующие значения для асинхронной машины АИМЛ71В4У3:

$$S_{кр} = \frac{C_1 \cdot R_2}{\sqrt{R_1^2 + C_1 \cdot X_k^2}} = \pm \frac{1,06 \cdot 8,8}{\sqrt{10,48^2 + 1,1 \cdot 19,21^2}} = \pm 0,42 \quad (6)$$

$$M_{кр} = \pm \frac{m \cdot p \cdot U_f^2}{2 \cdot C_1 \cdot \omega_1 \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + C_1 \cdot X_k^2} \right]} \quad (7)$$

В приведенных формулах знак «плюс» относится к определению величины для режима двигателя, а знак «минус» - для режима генератора. Необходимо отметить то, что критические значения момента отличаются по абсолютной величине: для двигателя $M_{кр.дв} = +12,66$ Н·м, для генератора $M_{кр.ген} = -34,40$ Н·м.

Работа асинхронной машины в пределах $\pm M_{кр}$ имеет устойчивый характер работы. Значения $\pm M_{кр}$ определяют границы устойчивости. Значение номинального момента асинхронной машины выбирают примерно в два раза меньше критического значения $M_{кр}$ для того, чтобы обеспечить перегрузочную способность машины [4].

Расчеты показали, что критическое значение момента в режиме генератора по абсолютной величине больше в 2,68 раза критического значения в режиме двигателя. Отношение критических значений моментов можно выразить формулой:

$$m_{кр} = \frac{M_{кр.ген}}{M_{кр.дв}} = \frac{\sqrt{R_1^2 + C_1 \cdot X_k^2} + R_1}{\sqrt{R_1^2 + C_1 \cdot X_k^2} - R_1} \quad (8)$$

Это отношение зависит от параметров схемы замещения R_1 и X_k , не зависит от активного сопротивления ротора R_2 . Следовательно, при введении добавочного сопротивления в цепь ротора отношение (8) не изменит своего значения.

Вывод

1. Критическое значение момента асинхронной машины в режиме генератора превышает в несколько раз соответствующее критическое значение момента в режиме двигателя. Следовательно, выбирая асинхронный двигатель по номинальному моменту для перевода его в режим генератора, всегда можно считать вполне достаточной его перегрузочную способность и в режиме генератора [5,6].

2. Кратность увеличения критического момента асинхронной машины в режиме генератора зависит от параметров схемы замещения R_1 и X_K и не зависит от сопротивления ротора R_2 . Следовательно, при введении активного сопротивления в цепь ротора кратность отношений критических значений не меняется [7,8,9].

3. Как видно из механических характеристик данное соотношение критических моментов сохраняется также для номинальных моментов асинхронной машины в режиме генератора и двигателя, тем самым обеспечивается устойчивая работа в генераторном режиме с нагрузкой превышающих значений номинальной мощности двигательного режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Y.M. Bobojonov, K. M. Reymov, B.T. Seytmuratov, K. Serjanov. Improving the technical and economic performance of autonomous electrical installations by using asynchronous generators. AIP Conf. Proc.3331, 070005 (2025), 070005-1- 070005-7. <https://doi.org/10.1063/5.0308108>.

2. Y Bobojonov, K. M. Reymov, B Seytmuratov. Analysis of changes in the operating parameters of an autonomously operating asynchronous generator based on a simulation model. AIP Conf. Proc.3331, 070009 (2025). 070009-1-070009-5 <https://doi.org/10.1063/5.0306159>.

3. Y Bobojonov, K. M. Reymov, B Seytmuratov. Asynchronous turbogenerator with a massive rotor with short-closed copper cells as a natural damper of electromechanical oscillations and a reliable source of Active Power, International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology Vol. 10, Issue 7, July 2023.

4. Y Bobojonov, K. M. Reymov, B Seytmuratov. Asynchronous generator with automatic reactive power controller. Science and Education in Karakalpakstan. 2023 №2/2 (33) ISSN 2181-9203. p. 43-46. Nukus.

5. Yu.M. Bobozhonov, B.T. Seytmuratov, T.T. Berdanov. Investigation of the dependence of the current frequency of the short-circuit rotor on the active load of asynchronous generators on the imitation model with different nominal power. Science and Education in Karakalpakstan. 2025 №1/2 (36) ISSN 2181-9203. p. 143-146. Nukus.

6. Ikromjon Rakhmonov, Fozildjon Khoshimov, Sultonkhoja Mahmutkhonov, Bayrambay Seytimuratov. SMART ENERGY MANAGEMENT FOR CONTINUOUS MANUFACTURING // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. Rakhmonov I.U. [и др.]. 2025. 9(138). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20758>.

7. Bobojonov Y.M., Reymov K.M., Seitmuratov B.T. Қисқа туташган роторли асинхрон генератор режим параметрлари ўзгаришларининг алмаштириш схемаси асосидаги таҳлили // «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари», №2, 2022-ж, 369-375-бетлар. (05.00.00; №21).

8. Bobojonov Y.M., Reymov K.M., Seitmuratov B.T. Асинхрон генератор чиқишидаги кучланиш ва частотанинг актив юкламага боғлиқлигини тажрибавий таҳлили // «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» №83. Тошкент, 2022й. с. 102-106.

9. Гайибов Т.Ш., Реймов К.М., Умаров Б.С., Садуақасов Д.С. Электр тұтынушылардың жүктемесін басқару арқылы энергожүйелердің қысқа мерзімді жұмыс режимдерін оңтайлы жоспарлауда желілік факторды ескеру // *Yessenov Science Journal*. – 2024. – №5. – 52–59 б. – URL: <https://journal.yu.edu.kz/index.php/yu/article/view/124>

ANALYSIS OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AN ASYNCHRONOUS MACHINE IN MOTOR-GENERATOR MODES BASED ON THE PARAMETERS OF THE SUBSTITUTION CIRCUIT

Y.M. Bobojonov, B.T. Seitmuratov, T.T. Berdanov

Karakalpak State University named after Berdakh, Nukis, Uzbekistan
e-mail: b_yunus@karsu.uz, s_bayram@karsu.uz, t_berdanov@karsu.uz

Annotation. As is known, in this regard, during the implementation of a number of decrees and resolutions adopted by the President of the Republic and the Cabinet of Ministers in 2024-2026, solar panels were installed at production enterprises in the regions, and micro-hydroelectric power plants were built among budgetary institutions and household consumers. In addition, over the past few years, foreign investors have built and commissioned large wind power plants. As a result, the country's complete dependence on traditional power plants was stopped, and the consumption of electricity produced by thermal power plants was reduced, which ensured significant energy resource savings.

Studies show that synchronous generators (SG) and asynchronous generators (AG) with phase windings and short-circuited rotors are used in WES and HES generator installations. Connecting capacitor banks to the stator windings allows for self-starting of the AG in the magnetic core due to its residual magnetization and fulfills requirements such as the stability of the output voltage. The proposed excitation method based on capacitors is decentralized, allowing the generator unit to adapt its operating modes under autonomous power supply conditions. In this article, based on the results of the conducted experiment, oscillograms reflecting the output voltage values in the transient processes of an AG with a 4 kW short-circuited rotor were obtained and analyzed.

Keywords: Self-excited short-circuited rotor AH, mechanical characteristic, replacement scheme.

АСИНХРОНДЫ МАШИНАНЫҢ ОРЫНБАСУ СҮЛБАСЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІ НЕГІЗІНДЕ ҚОЗҒАЛТҚЫШ-ГЕНЕРАТОР РЕЖИМДЕРІНДЕГІ МЕХАНИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ТАЛДАУ

Ю.М. Бобожонов, Б.Т. Сеитмуратов, Т.Т. Берданов

Бердақ атындағы Қарақалпақ мемлекеттік университеті, Нүкіс, Өзбекстан
e-mail: b_yunus@karsu.uz, s_bayram@karsu.uz, t_berdanov@karsu.uz

Аннотация. Белгілі болғандай, осы бағытта 2024–2026 жылдары Қазақстан Республикасы Президенті мен Министрлер Кабинеті қабылдаған бірқатар қаулылар мен шешімдерді іске асыру барысында өңірлердегі өндірістік кәсіпорындарға күн панельдері орнатылды, сондай-ақ бюджеттік ұйымдар мен тұрмыстық тұтынушылар арасында шағын су электр станциялары салынды. Сонымен қатар соңғы бірнеше жыл ішінде шетелдік инвесторлар ірі жел электр станцияларын салып, пайдалануға берді. Нәтижесінде елдің дәстүрлі электр станцияларына толық тәуелділігі азайып, жылу электр станцияларында өндірілетін электр энергиясын тұтыну төмендеді, бұл энергия ресурстарын айтарлықтай үнемдеуге мүмкіндік берді.

Зерттеулер көрсеткендей, жел және су электр станцияларының генераторлық қондырғыларында фазалық орамдары бар синхронды генераторлар (СГ) және қысқа тұйықталған роторлы асинхронды генераторлар (АГ) қолданылады. Статор орамдарына конденсатор батареяларын қосу арқылы асинхронды генератордың магнит өзегіндегі қалдық магниттелу есебінен өзін-өзі қоздыруы қамтамасыз етіледі және шығыс кернеуінің тұрақтылығын қамтамасыз ету сияқты талаптарды орындайды. Конденсаторларға негізделген ұсынылған қоздыру әдісі орталықтандырылмаған болып табылады және генератор қондырғысына автономды электрмен жабдықтау жағдайында жұмыс режимдерін бейімдеуге

мүмкіндік береді. Осы мақалада жүргізілген эксперимент нәтижелері негізінде қуаты 4 кВт қысқа тұйықталған роторлы асинхронды генератордың өтпелі процестеріндегі шығыс кернеуінің осциллограммалары алынып, талданды.

Түйін сөздер: Өзін-өзі қоздыратын қысқа тұйықталған роторлы асинхронды генератор, механикалық сипаттама, орналасу сұлбасы.