

*А.М. ГАЛИНОВСКИЙ***ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

В технической литературе приведены противоречивые рекомендации по применению асинхронных машин с короткозамкнутым ротором промышленного производства в ветроэнергетических установках малой мощности при работе параллельно с сетью. Это, прежде всего, связано с несовершенством методики расчета характеристик асинхронных машин по Г-образной схеме замещения. Совершенствование автоматизированной методики расчета асинхронных машин с короткозамкнутым ротором в режимах двигателя и генератора, анализ работы асинхронных генераторов ветроэнергетических установок малой мощности на базе асинхронных двигателей промышленного производства при изменении напряжения сети, разработка рекомендации по улучшению характеристик ветроэнергетических установок является целью работы. В разработанной методике расчета характеристики асинхронной машины определяются по Т-образной схеме замещения при учете нелинейных изменений ее параметров. В алгоритме расчета при заданном скольжении независимой переменной применяется величина результирующей электродвижущей силы, которая в дальнейшем уточняется по указанной в задании величине напряжения сети, мощности турбины или мощности двигателя. По результатам исследований установлено: расчет асинхронного генератора ветроэнергетической установки при номинальном напряжении сети и неизменных параметрах схемы замещения может привести к существенной ошибке в определении расчетной мощности генератора; увеличение напряжения сети в предусмотренных стандартом пределах может привести к уменьшению мощности генератора до 50 % от номинальной мощности асинхронного двигателя. Технико-экономические показатели установки можно существенно улучшить при увеличении числа витков статорных обмоток асинхронной машины при допустимом коэффициенте заполнения паза. Разработанная методика может быть применена при проектировании асинхронных машин.

Ключевые слова: асинхронная машина, двигатель, генератор, напряжение, сеть, характеристики.

*О.М. ГАЛИНОВСЬКИЙ***ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ НА БАЗІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ**

У технічній літературі наведені суперечливі рекомендації щодо застосування асинхронних машин з короткозамкнутим ротором промислового виробництва в вітроенергетичних установках малої потужності при роботі паралельно з мережею. Це, перш за все, пов'язано з недосконалістю методики розрахунку характеристик асинхронних машин по Г-образній схемі заміщення. Удосконалення автоматизованої методики розрахунку асинхронних машин з короткозамкненим ротором в режимах двигуна і генератора, аналіз роботи асинхронних генераторів вітроенергетичних установок малої потужності на базі асинхронних двигунів промислового виробництва при зміні напруги мережі, розробка рекомендацій щодо поліпшення характеристик вітроенергетичних установок є метою роботи. У розробленій методиці розрахунку характеристик асинхронної машини визначаються по Т-подібній схемі заміщення при обліку нелінійних змін її параметрів. В алгоритмі розрахунку при заданому ковзанні незалежної змінної застосовується величина результируючої електродвижущої сили, яка в подальшому уточнюється за вказаною в завданні величиною напруги мережі, потужності турбіни або потужності двигуна. За результатами досліджень встановлено: розрахунок асинхронного генератора вітроенергетичної установки при номінальній напрузі мережі і незмінних параметрах схеми заміщення може привести до істотної помилки у визначенні розрахункової потужності генератора; збільшення напруги мережі в передбачених стандартом межах може привести до зменшення потужності генератора до 50% від номінальної потужності асинхронного двигуна. Техніко-економічні показники установки можна істотно поліпшити при збільшенні числа витків статорних обмоток асинхронної машини при допустимому коефіцієнті заповнення паза. Розроблена методика може бути застосована при проектуванні асинхронних машин.

Ключові слова: асинхронна машина, двигун, генератор, напруга, мережа, характеристики.

*O.M. GALINOVSKIY***PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF LOW POWER GENERATORS FOR WIND POWER PLANTS ON THE BASIS OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH A SHORT CIRCUITED ROTOR**

The technical literature provides conflicting recommendations on the use of asynchronous machines with a short-circuited rotor of industrial production in wind power plants of low power when operating in parallel with the network. This is primarily due to the imperfection of the method of calculating the characteristics of asynchronous machines on the T-shaped equivalent circuit. Improving the automated method for calculating asynchronous machines with a squirrel-cage rotor in motor and generator modes, analyzing the operation of asynchronous generators of low-capacity wind turbines based on industrial-grade asynchronous motors when the network voltage changes, developing recommendations for improving the characteristics of wind turbines is the goal of the paper. In the developed method of calculation the characteristics of an asynchronous machine are determined by the T-shaped equivalent circuit taking into account the nonlinear changes in its parameters. In the calculation algorithm for a given slip, as an independent variable the value of the resulting electromotive force is applied, which is further corrected by the network voltage, turbine power or motor power specified in the task. According to the results of the research, it has been established: the calculation of an asynchronous generator of a wind power installation at nominal network voltage and constant parameters of the equivalent circuit can lead to a significant error in determining the calculated generator power; an increase in the network voltage within the limits provided for in the Standard may lead to a decrease in the generator power up to 50% of the rated power of the asynchronous motor. Technical and economic indicators of the installation can be significantly improved by increasing the number of turns of the stator windings of the asynchronous machine with the allowable fill factor of the slot. The developed technique can be applied when designing asynchronous machines.

Keywords: asynchronous machine, motor, generator, voltage, network, characteristics.

Введение. Соответственно Глобальному международному проекту «Wind Force» в 2020 году ветроэнергетические установки (ВЭУ) должны производить не менее 12% электроэнергии [4]. В настоящее время ВЭУ Украины генерируют $\approx 1\%$ от общей годовой генерации электроэнергии страны [7]. Украина существенно отстает по необходимым темпам развития ВЭУ.

В Украине выпускаются бытовые ВЭУ единичной мощностью $1 \div 25$ кВт. Они производят сравнительно дорогую электроэнергию, но часто бывают незаменимые, особенно там, где нет других источников энергии [7].

В работе [6] рассмотрены вопросы применения разных типов генераторов для ВЭУ, выделены позитивные и негативные стороны применения асинхронных генераторов (АГ) с короткозамкнутым (к.з.) ротором. АГ имеет простую конструкцию, надежность в обслуживании, малую стоимость. В качестве АГ малой мощности часто применяются серийные асинхронные двигатели (АД) с к.з. ротором.

Работа асинхронной машины с к.з. ротором (АМ) в сети считается достаточно хорошо изученной. Однако в технической литературе сравнительно мало внимания уделяется расчету характеристик АГ, в качестве которых применены серийные АД. Их применение как генераторов ВЭУ может быть не оптимальным из-за другого режима работы, другого напряжения сети. Поэтому рекомендации по применению АГ в ВЭУ малой мощности при работе в сети противоречивы [6, 7].

За номинальное напряжение электрических систем низкого напряжения принимается $U_{IN} = 400$ В, устоявшееся отклонение напряжения составляет: нормальное значение $\pm 5\%$; предельное значение $\pm 10\%$. Для электрических сетей общего назначения за номинальное напряжение (напряжение потребителя) принимается $U_{IN} = 380$ В. Поэтому АГ должен работать в сети при изменении напряжения (как минимум) от 360 В до 420 В.

В народном хозяйстве Украины широко употребляются АД серии 4А мощностью $0,06 \div 400$ кВт. Соответственно приведенной аннотации данных справочника [1] по указанной серии АД «не всегда достаточно» даже для ремонта электродвигателей. Значит, – их «не всегда достаточно» и для расчета параметров и характеристик АМ как в режимах двигателей, так и в режимах генераторов.

В работе [2] приведены методы расчета характеристик АД, которые базируются на системе уравнений токов и напряжений Г-образной схемы замещения. Расчеты проводятся в скалярной форме при ряде допущений. Поэтому неточности в определении некоторых расчетных величин могут существенно сказаться на конечных результатах расчетов.

В работе [3] приведена автоматизированная методика расчета характеристик АД с к.з. ротором на базе уточненной Т-образной схемы замещения при учете нелинейных изменений параметров схемы. Однако методика расчета имеет существенный недостаток: неточность расчетов АМ в рабочих режимах дви-

гателя и генератора в зоне малых скольжений. Отметим относительную сложность методики расчета. Поэтому актуальным является совершенствование методики расчета АМ с к.з. ротором в разных режимах работы при изменении параметров сети.

Совершенствование автоматизированной методики расчета асинхронных машин с к.з. ротором в режимах двигателя и генератора, анализ работы асинхронных генераторов ВЭУ малой мощности на базе асинхронных двигателей промышленного производства при изменении напряжения сети, разработка рекомендации по улучшению характеристик ВЭУ является целью настоящей работы.

Параметры Т-образной схемы замещения асинхронной машины. На рис. 1 показана уточненная Т-образная схема замещения асинхронной машины с к.з. ротором.

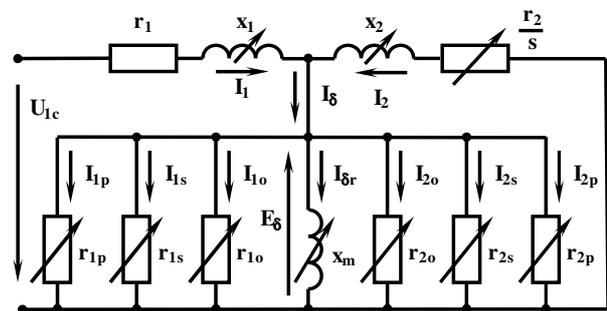


Рис. 1. Уточненная схема замещения АМ с к.з. ротором

Принятые обозначения: U_{1c} – напряжение сети; $E_δ$ – результирующая ЭДС; I_1, I_2 – токи обмоток статора и ротора; $I_δ, I_{δr}, I_{1o}, I_{1s}, I_{1p}, I_{2o}, I_{2s}, I_{2p}$ – полный ток, реактивный и активные токи намагничивающего контура; r_1, x_1, r_2, x_2 – активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора; s – скольжение; x_m – главное индуктивное сопротивление. Параметры ротора приведены к статору. Активные сопротивления намагничивающего контура [4]:

$$r_{1o} = r_{1o50} \cdot (50/f_1)^\beta; r_{1s} = r_{1s50} \cdot (50/f_1)^{1.5}; r_{1p} = r_{1p50} \cdot (50/f_1)^2;$$

$$r_{2o} = r_{2o50} \cdot (50/f_2)^\beta; r_{2s} = r_{2s50} \cdot (50/f_2)^{1.5}; r_{2p} = r_{2p50} \cdot (50/f_2)^2.$$

Первые нижние индексы («1» и «2») присвоены величинам статора и ротора соответственно. Вторые нижние индексы присвоены величинам сопротивлений, на которых выделяются потери в стали: «o» – основные; «s» – поверхностные; «p» – пульсационные. Обозначения частот: f_1 – частота сети; f_2 – частота ротора; $f_δ$ – частота вращения вала, β – показатель степени, зависящий от марки и толщины листа стали. $r_{1o50}, r_{2o50}, r_{1s50}, r_{2s50}, r_{1p50}, r_{2p50}$ – сопротивления намагничивающего контура при частотах $f_1 = f_2 = f_δ = 50$ Гц:

$$r_{1o50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{1o50}; r_{1s50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{1s50}; r_{1p50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{1p50};$$

$$r_{2o50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{2o50}; r_{2s50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{2s50}; r_{2p50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{2p50},$$

где $p_{1o50}, p_{1s50}, p_{1p50}, p_{2o50}, p_{2s50}, p_{2p50}$ – потери в стали при $f = 50$ Гц.

Определение параметров Т-образной схемы замещения АМ проводится по известным методикам [2]. Кривые намагничивания стали и другие нелинейные зависимости, полученные в процессе расчета, могут использоваться в табличном или экспоненциальном виде. При расчете параметров АМ учитываются

вытеснение общего потока из зубца в паз, эффект вытеснения тока ротора.

Расчет асинхронных машин при заданной величине напряжения сети. На рис. 2. показан усовершенствованный алгоритм расчета характеристик АМ при заданной величине напряжения сети U_{1c} .

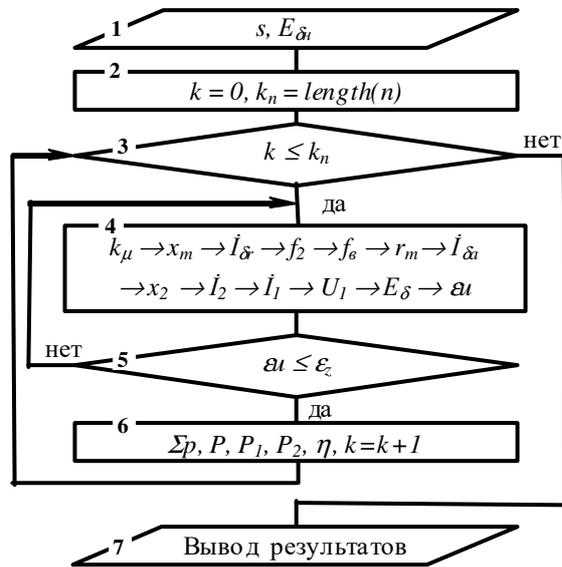


Рис. 2. Алгоритм расчета АМ

Задаемся массивом скольжения s размером k_n и начальным значением величины ЭДС E_δ . Точность задания величины E_δ . принципиального значения не имеет.

Для k -ой точки массива в блоке вычислений 4 определяем величины $k_\mu, x_m, \dot{I}_\delta, f_2, f_\phi, r_m, \dot{I}_\delta, x_2, \dot{I}_2, \dot{I}_1, U_1, E_\delta, \epsilon_u$. При этом напряжение сети

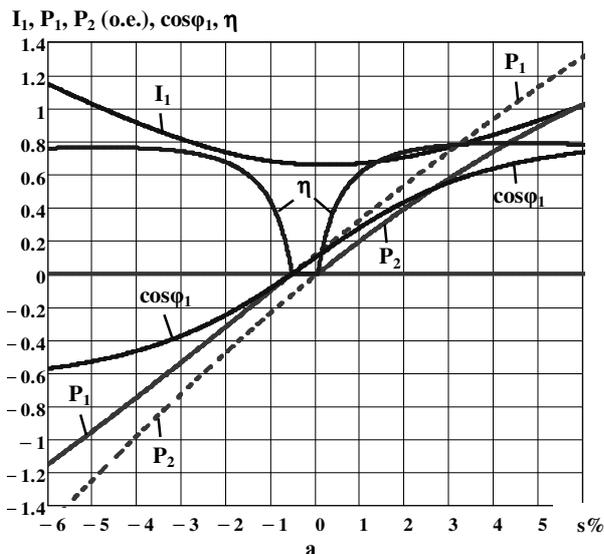
$$\dot{U}_1 = -E_{\delta n} e^{j0} + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1, \tag{1}$$

уточненное значение ЭДС

$$E_\delta = E_{\delta n} |U_{1c} / U_1|, \tag{2}$$

погрешность расчета

$$\epsilon_u = |1 - U_{1c} / U_1|. \tag{3}$$



Если погрешность ϵ_u больше заданной величины ϵ_z , то повторяем расчет с уточненным значением E_δ .

В блоке вычислений 6 рассчитываем суммарные потери Σp , мощности P_1 и P_2 , КПД и др. величины.

Проведены исследования параметров и характеристик АМ на базе отрезка серии АД мощностью 1.5 – 5.5 кВт. На рис. 3-5 показаны результаты исследований АМ на базе АД типа 4А112МА8У3 в рабочих режимах двигателя и генератора. Номинальные параметры АД: $P_{2N} = 2.2$ кВт; $U_{1N} = 380$ В; $P_1 = 2.81$ кВт; $\cos \phi_{1N} = 0.728$; $\eta_N = 0.783$; $I_{1N} = 5.86$ А; $s_N = 0.0583$.

На рис. 3 показаны зависимости $P_1, I_1, \cos \phi_1, P_2$ и η от скольжения s при $U_1 = 380$ В (а) и $U_1 = 420$ В (б), где: P_1 – активная мощность, потребляемая из сети (или отдаваемая в сеть); P_{1G} – активная мощность, отдаваемая в сеть при работе АМ в режиме генератора; P_2 – мощность на валу АМ; P_{2D} – мощность на валу АМ в режиме двигателя; η – КПД АМ. Величины P_1 и P_2 выделены пунктирными линиями. Мощности (P_2, P_{2D}, P_1, P_{1G}) и ток статора (I_1) приведены в относительных единицах (о.е.). За базовые приняты величины P_{2N} и I_{1N} .

На рис. 4 показаны зависимости результирующей ЭДС воздушного зазора E_δ и максимальных значений индукций в зубцах статора и ротора (B_{z1max} и B_{z2max}) от скольжения при $U_1 = 380$ В (а) и $U_1 = 420$ В (б).

На рис. 5 показаны рабочие характеристики АГ при $U_1 = 380$ В и $U_1 = 420$ В.

В табл. 1 приведены параметры АГ на базе отрезка серии АД при номинальном токе и напряжениях сети: $U_1 = 380$ В; $U_1 = 420$ В.

Как видно из результатов расчета, при $I_1 = I_{1N} = 1$ о.е. с увеличением напряжения сети от $U_{1л} = 380$ В до $U_{1л} = 420$ В и сохранении номинального тока мощность АГ может существенно уменьшиться. У ВЭУ с АГ типа 4А112МА8У3 при $U_1 = 420$ В мощность АГ составляет всего $0.51 \cdot P_{2N}$.

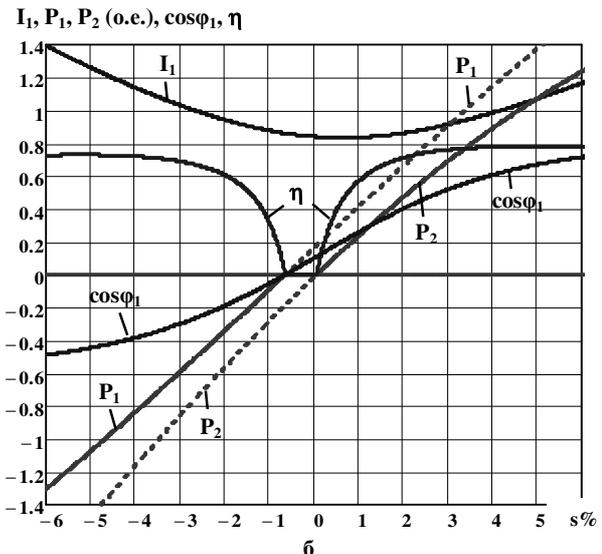


Рис. 3. Зависимости $P_1, P_2, I_1, \cos \phi_1$ и η АМ типа 4А112МА8У3 от скольжения: а – $U_1 = 380$ В; б – $U_1 = 420$ В

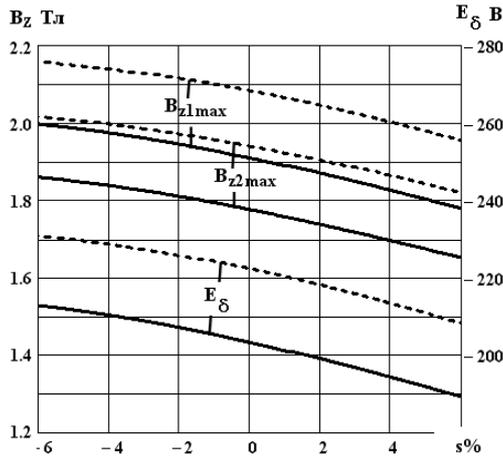


Рис. 4. Зависимости E_{δ} , B_{z1max} и B_{z2max} АМ от s : $U_1 = 380$ В – сплошные; $U_1 = 420$ В – пунктирные

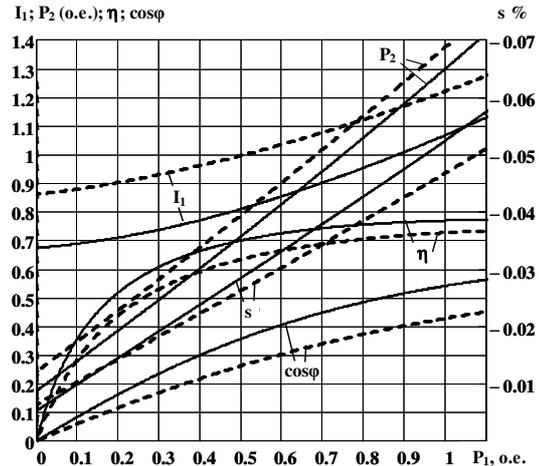


Рис. 5. Рабочие характеристики АГ: $U_1 = 380$ В – сплошные; $U_1 = 420$ В – пунктирные

Таблица 1 – Параметры АГ при номинальном токе и напряжениях сети $U_1 = 380$ В и $U_1 = 420$ В

№ п/п	Тип АД	P_N , Вт	U_1 , В	I_1 , о.е.	P_{1G} , о.е.	P_T , о.е.	η	$\cos\phi$
1	4A100L8Y3	1500	380	1	0.912	1.187	0.768	0.490
			420	1	0.791	1.083	0.730	0.425
2	4A112MA8Y3	2200	380	1	0.909	1.188	0.763	0.462
			420	1	0.510	0.760	0.671	0.266
3	4A112MB8Y3	3000	380	1	0.955	1.196	0.799	0.579
			420	1	0.767	1.023	0.749	0.465
4	4A132S8Y3	4000	380	1	0.952	1.174	0.811	0.567
			420	1	0.695	0.932	0.746	0.414
5	4A132M8Y3	5500	380	1	0.999	1.203	0.830	0.634
			420	1	0.959	1.178	0.814	0.551

По результатам исследований АМ без учета и с учетом изменения параметров схемы замещения при $U_1 = \text{const}$ установлено: расчет АГ с постоянными параметрами схемы замещения может привести к существенной ошибке в определении расчетной мощности генератора.

Расчетные мощности АГ на базе АД 4A100L8Y3 (определены при $U_1 = 380$ В и $I_1 = I_{1N}$):

$P_G = 1.252P_{2N}$ – при постоянных параметрах схемы замещения;

$P_G = 0.95P_{2N}$ – при учете изменения параметров схемы замещения.

Ошибка в определении расчетной мощности АГ при постоянных параметрах составляет $\approx 30\%$.

Расчет АГ при номинальных мощностях ветротурбин и разных напряжениях сети. Номинальной мощностью ветротурбины называем мощность турбины P_{TN} при напряжении сети $U_1 = 380$ В и номинальном токе статора АГ.

Таблица 2 – Параметры АГ при номинальных мощностях турбин и разных напряжениях сети

№ п/п	Тип АД	P_N , Вт	U_1 , В	I_1 , о.е.	P_1 , о.е.	P_{TN} , о.е.	η	$\cos\phi$	Σp , о.е.
1	4A100L8Y3	1500	380	1	0.963	1.252	0.758	-0.499	0.304
			420	1.042	0.932		0.745	-0.425	0.319
2	4A112MA8Y3	2200	380	1	0.907	1.188	0.764	0.517	0.281
			420	1.134	0.857		0.710	0.387	0.327
3	4A112MB8Y3	3000	380	1	0.959	1.2	0.791	-0.578	0.251
			420	1.074	0.920		0.771	-0.472	0.275
4	4A132S8Y3	4000	380	1	0.953	1.175	0.814	-0.569	0.218
			420	1.094	0.910		0.789	-0.453	0.247
5	4A132M8Y3	5500	380	1	0.999	1.187	0.826	-0.630	0.206
			420	1.004	0.967		0.822	-0.555	0.212

Отметим особенности алгоритма расчета АГ.

Задаемся массивом скольжения s размером k_n и начальным значением величины ЭДС E_{δ} .

Для k -ой точки массива в блоке вычислений 4 определяем величины k_{μ} , x_m , $\dot{I}_{\delta r}$, f_2 , f_{ϕ} , r_m , $\dot{I}_{\delta a}$, x_2 , \dot{I}_2 , \dot{I}_1 , U_1 , Σp , P_1 , P_2 , η .

Величина U_1 определяется по (1).

Уточненное значение ЭДС

$$E_{\delta} = E_{\delta H} \cdot \sqrt{P_{TN}/P_2} \tag{4}$$

Погрешность расчета

$$\epsilon p = |1 - P_{TN}/P_2| \tag{5}$$

Если погрешность ϵp больше заданной величины ϵz , то повторяем расчет с уточненным значением E_{δ} .

В табл. 2 приведены параметры АГ при номинальных мощностях ветротурбин и напряжениях сети 380 В и 420 В.

Из результатов исследований следует: увеличение напряжения сети от 380 до 440 В приводит к существенному снижению мощности АГ, уменьшению величин КПД и $\cos\phi$. Это, прежде всего, связано с увеличением коэффициента насыщения магнитной цепи АГ, которое приводит к увеличению реактивной составляющей тока статора. Уменьшение влияния указанного фактора возможно при увеличении числа витков статорной обмотки АГ.

Характеристики АГ с разными числами витков статорных обмоток. Увеличим число витков статорных обмоток исследуемых АМ примерно на 10% при условии: коэффициент заполнения паза $k_3 < 0.75$.

В АМ 4A100L8Y3, 4A112MA8Y3, 4A112MB8Y3 и 4A132M8Y3 увеличение числа витков статорных обмоток проведено при сохранении марки провода.

В АМ 4A132S8Y3 увеличение числа витков выполнено при уменьшении площади эффективного проводника на 11 %.

В табл. 3 приведены параметры ветротурбин и АГ с разными числами витков статорных обмоток при

напряжении сети $U_1 = 400$ В. Параметры ветротурбин и АГ при увеличении чисел витков обмоток определялись при сохранении суммарные потерь (Σp) АГ.

В соответствии с данными табл. 3 увеличение числа витков статорных обмоток АГ позволяет увеличить мощности всех АГ и ветротурбин.

Увеличение числа витков статорной обмотки АМ 4A112MA8Y3 проводит к:

- увеличению мощности ветротурбины на 11.2 %;
- увеличению мощность АГ на 18.8 %.

При увеличении числа витков статорной обмотки АМ 4A132S8Y3 (с уменьшением площади эффективного проводника) мощность АГ увеличена на 9.5 % при увеличении мощности ветротурбины на 5.5 %.

Теперь исследуем АГ с разными числами витков статорных обмоток при номинальных мощностях ветротурбин. На рис. 6 показаны зависимости I_1 , P_1 , P_2 , Σp , η , $\cos\phi_1$ АГ 4A112MA8Y3 от напряжения U_1 при числах витков обмотки: а – $w_1=39$; б – $w_1=43$.

Таблица 3 – Параметры ветротурбин и АГ при напряжении сети $U_1=400$ В, разных числах витков статорных обмоток и одинаковых суммарных потерях АГ

№ п/п	Базовый АД	P_N , Вт	Число w_1	Σp , о.е.	I_1 о.е.	P_{1G} о.е.	P_T о.е.	η	$\cos\phi$
1	4A100L8Y3	1500	56	0.312	1.017	0.951	1.252	0.76	0.466
			61		0.999	0.983	1.252	0.785	0.527
2	4A112MA8Y3	2200	39	0.297	1.047	0.883	1.188	0.742	0.455
			43		0.955	1.049	1.321	0.794	0.593
3	4A112MB8Y3	3000	31	0.258	1.022	0.944	1.2	0.787	0.532
			34		0.945	1.032	1.261	0.818	0.628
4	4A132S8Y3	4000	27	0.225	1.028	0.936	1.175	0.797	0.513
			30		0.926	1.024	1.24	0.825	0.624
5	4A132M8Y3	5500	21	0.206	0.989	0.979	1.187	0.824	0.596
			23		0.955	1.095	1.298	0.843	0.691

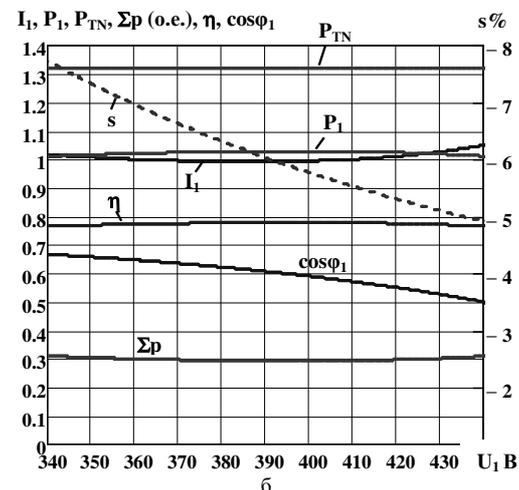
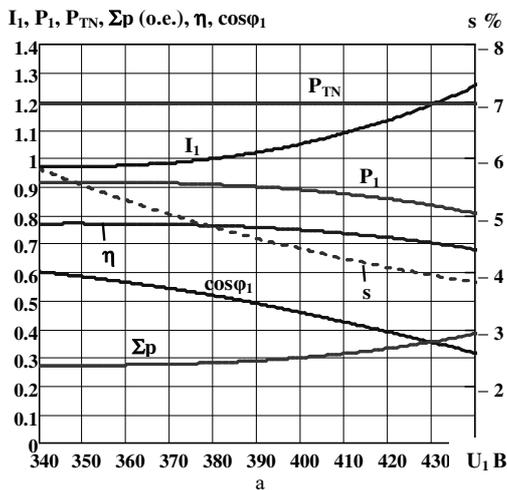


Рис. 6. Величины I_1 , P_1 , P_{TN} , Σp , η , $\cos\phi_1$ АГ 4A112MA8Y3 в зависимости от напряжения U_1 при числах витков обмотки статора: а – $w_1=39$; б – $w_1=43$

При $w_1 = 39$ номинальная мощность ветротурбины $P_{TN} = 1.188$ о.е. (табл. 2). Изменение основных расчетных величин АГ при изменении напряжения сети от $U_1 = 380$ В до $U_1 = 440$ В (рис. 6, а):

$$I_1 = (1 \div 1.253) \cdot I_{1N};$$

$$P_1 = (0.907 \div 0.806) \cdot P_{2DN};$$

$$\eta = 0.763 \div 0.678.$$

При $w_1 = 43$ номинальная мощность ветротурбины $P_{TN} = 1.322$ о.е. Изменение основных расчетных величин АГ при изменении напряжения сети от $U_1 = 380$ В до $U_1 = 440$ В (рис. 6, б):

$$I_1 = (1 \div 1.05) \cdot I_{1N};$$

$$P_1 = (1.03 \div 1.01) \cdot P_{2DN};$$

$$\eta = 0.777 \div 0.776.$$

Как следует из результатов исследований, при увеличении числа витков статорной обмотки АД можно существенно улучшить технико-экономические показатели ВЭУ.

Расчет АД с номинальной нагрузкой при изменении напряжения сети. Алгоритм расчета АД с номинальной нагрузкой при изменении напряжения сети подобен алгоритму расчета АД при номинальной мощности ветротурбины.

В формулах (4) и (5) меняем величину P_{TN} на P_{2DN} .

Уточненное значение ЭДС $E_{\delta} = E_{\delta H} \sqrt{P_{2DN}/P_2}$.

Погрешность расчета $\epsilon_p = |1 - P_{2DN}/P_2|$.

Из результатов исследований отрезка серии АД малой мощности следует:

при номинальной нагрузке АД с изменением напряжения сети в пределах $0.9U_{1CN} \div 1.1U_{1C}$ остаются практически неизменными величины I_1 , Σp , P_1 , η ;

с увеличением напряжения (как и в асинхронных генераторах) уменьшаются скольжение s и $\cos\phi_1$ асинхронных двигателей.

В качестве примера на рис. 7 показаны зависимости основных расчетных величин АД типа 4А112МА8У3 (I_1 , P_1 , P_2 , Σp , $\cos\phi_1$, η) от напряжения сети при $P_2 = P_{2DN} = 2.2$ кВт = 1 о.е.

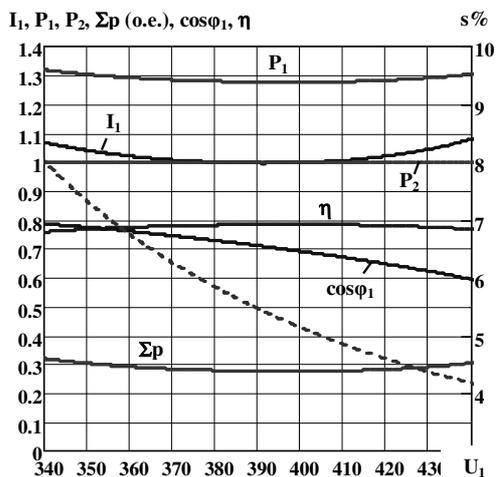


Рис. 7. Характеристики АД с номинальной нагрузкой на валу в зависимости от напряжения сети

Выводы:

1. Проведено совершенствование методики автоматизированного расчета характеристик АД с к.з. ротором при учете нелинейных изменений параметров Т-образной схемы замещения.

2. По результатам исследований характеристик генераторов ВЭУ малой мощности на базе отрезка серии АД с к.з. ротором установлено: увеличение напряжения сети в предусмотренных стандартом пределах может привести к уменьшению мощности гене-

ратора до 50 % от номинальной мощности АД. Технико-экономические показатели ВЭУ существенно улучшаются при увеличении (\approx на 10%) числа витков статорных обмоток машины.

3. Разработанная методика расчета может быть применена при проектировании асинхронных машин с к.з. ротором.

Список литературы

1. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
2. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перер. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с. – (Основы наук).
3. Галиновский А. М. Совершенствование методики расчета рабочих и пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / А. М. Галиновский, В. А. Бовер, А. Н. Давыдов, А. С. Вишневикий // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук : КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011 (15). – С. 131–133.
4. Никишин А.Ю., Казаков В.П. Современные ветроэнергетические установки на базе асинхронных машин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6.
5. Шевченко В.В., Кулиш Я.Р. Анализ возможности использования разных типов генераторов для ветроэнергетических установок с учетом диапазона мощности // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – №65. – С. 107–117.
6. Бубенчиков А.А., Дайчман Р.А., Артамонова Е.Ю. и др. Выбор оптимального генератора для ветроустановки. Опубликовано в 2015, Выпуск Ноябрь 2015, Технические науки.
7. Українська Вітроенергетична корпорація / Відновлювана енергетика, вітрові електростанції під загальною редакцією І.В. Плачкова та А.Є. Конеченкова / лютий 2017 р. – www.uwea.com.ua

References (transliterated)

1. Asynchronous engine series 4A: Reference book A.E. Kravchik, M.M. Shlaf, V.I. Afonin, E.A. Sobolenskaja. Moscow: Energoisdat, 1982. 504 p.
2. Planning of electric machines: textbook for the institutes of higher. pod red. I.P. Kopilova. 4-e izd., perer. i dop. Moscow: Izdatelstvo Jurajt, 2011. 767 p.
3. Galinovskiy A. Perfection of method of calculation of workings and starting descriptions of asynchronous engine with shortcircuited rotor. Galinovskiy A., Bober V., Davydov A., Vishnevsky A. Electromechanical and energy saving systems. Quarterly research and production journal. Kremenchuk: KrNU, 2011. No 3/2011(15). pp. 131–133.
4. Nikishin A.Ju., Kazakov V.P. Sovremennye vetro-energeticheskie ustanovki na baze asinchronnykh machin. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. No 6.
5. Shevchenko V.V., Kulish Ja.R. Analiz vozmozhnosti ispol'zovaniya raznykh tipov generatorov dlja vetroenergeticheskikh usta-novok s uchetom diapazona moshhnosti. V.V. Shevchenko, Ja. R. Kulish. Vestnik NTU "HPI". 2013. 65. pp.107–117.
6. Bubenichikov A.A., Dajchman R.A., Artamonova E.J. i dr. Vyb or optimalnogo generatora dlja vetroustanovki. Issue November 2015, tehnikeskije nauki.
7. Ukrainian wind energy association. Vidnovljувана енергетика, vitrovi elektrostanziji pid zahalnoju redakzijeju I.V. Plachkova ta A.E. Konechenkova. February 2017 Year. www.uwea.com.ua

Поступила (received) 09.10. 2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Галиновський Олександр Михайлович (Галиновский Александр Михайлович, Galinovskiy Oleksandr) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", доцент кафедри електромеханіки, м. Київ, Україна; e-mail: alga040@gmail.com.