

УДК 621.313.332

П.Ф.Васько¹, докт.техн.наук, В.М.Головко², докт.техн.наук, А.П.Вербовий³, канд.техн.наук (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Вищі гармонійні складові напруги та струму асинхронного генератора з короткозамкненою обмоткою ротора у складі малих вітро- та гідроелектричних установок

Наведено результати експериментальних досліджень асинхронного генератора з короткозамкненою обмоткою ротора в автономному режимі роботи та за паралельної роботи з промисловою електромережею. Проаналізовано гармонійні складові напруги і струму та їх відповідність гранично припустимим значенням. Бібл. 11, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: асинхронний генератор, гармонійні складові, напруга, навантаження, струм.

ORCID: ¹0000-0001-8807-7173; ²0000-0003-0195-9654; ³0000-0003-2838-6032

Вступ. Для перетворення механічної енергії в електричну на валу турбіни малих вітро- та гідроелектричних установок знаходять застосування асинхронні генератори (АГ) з короткозамкненою обмоткою ротором та ємнісним збудженням [1–3]. Їх масштабне впровадження тривалий час стримувалось через значну масу та вартість конденсаторів збудження. На сьогодні ця причина не є вирішальною, тому що створені високоефективні плівкові конденсатори (наприклад, серія К78-17) на робочу напругу 500 В і частоту 50 Гц з питомою масою 0,12-0,15 кг/кВАр, що майже на порядок менше в порівнянні з самим генератором малої потужності. Асинхронний генератор є більш простим пристроєм, ніж синхронні аналоги, і характеризується низькою вартістю, стійкістю до коротких замикань та перевантаження, високою захищеністю від бруду та вологи, надійністю експлуатації та тривалим терміном служби. Ще одна перевага полягає у відсутності обертових електронних пристроїв, що чутливі до зовнішніх впливів і досить часто виходять із ладу. Задачі визначення масогабаритних та енергетичних показників, розрахунку експлуатаційних та регулювальних характеристик АГ з ємнісним збудженням детально висвітлені в [4–7]. Проте потребують подальшого дослідження питання якості параметрів генерованої електроенергії, зокрема, гармонійних складових напруги та струму.

Аналіз причин виникнення вищих гармонік та їх вплив на роботу асинхронного генератора. Наявність вищих гармонійних складових напруги та струму асинхронного генератора з короткозамкненою обмоткою ротора зумовлена несинусоїдальністю розподілу магніторушійної сили (МРС) у повітряному зазорі машини [8, 9] внаслідок конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Конструктивний фактор полягає у наявності пазів на статорі і роторі та дискретності розташування провідників обмоток у пазах. Крива розподілу магнітного поля в повітряному зазорі визначається розподілом МРС і розподілом магнітної провідності зазору. У результаті крива індукції, створювана обмоткою зі східчастим розподілом МРС, набуває складної форми, і її можна представити як суму гармонійних складових. Амплітуда гармонік генерованого струму і напруги залежить від співвідношень між геометричними параметрами зубцево-пазового шару, числа зубців і величини повітряного зазору.

Технологічний та експлуатаційний фактори зумовлені наявністю ексцентриситету ротора асинхронного генератора та перевищенням номінального значення напруги на клеммах статорної обмотки. Ексцентриситет ротора виникає як у процесі виготовлення генератора, так і в результаті експлуатації. При ексцентриситеті з'являється нерівномірність повітряного зазору,

яка додатково спотворює розподіл магнітного поля та зумовлює наявність сили однобічного магнітного тяжіння ротора. З появою значного ексцентриситету ротора зменшується коефіцієнт корисної дії (ККД), знижується максимальний і пусковий моменти, збільшується ковзання. Своєчасне виявлення ексцентриситету на ранніх стадіях його розвитку має практичне значення і є одним із важливих завдань контролю технічного стану асинхронного генератора та діагностики його дефектів. Діагностувати ексцентриситет ротора можливо за допомогою вимірювального щупа, вібродатчиків, спектрального аналізу струмів статора. Останній спосіб має перевагу з точки зору віддаленого моніторингу. Необхідно якомога точніше вимірювати струм статора з урахуванням гармонійних складових, оскільки тривала робота генератора з перевантаженням значно скорочує строк експлуатації [10].

Короткий опис лабораторного стенду для експериментальних досліджень гармонійного складу напруги і струму асинхронного генератора з короткозамкненою обмоткою ротора. Дослідження виконувались у лабораторії Інституту відновлюваної енергетики НАН України. Вони проводились для режимів холостого ходу, роботи на автономне номінальне активне навантаження та паралельної роботи з промисловою електричною мережею. Виміри напруги та струму здійснювались безпосередньо в обмотці генератора до місця під'єднання конденсаторної батареї та після неї в лінії електроживлення навантаження.

Лабораторний стенд складався з приводного двигуна постійного струму (ДПС), зчепленого з АГ, батареї конденсаторів, навантаження, комутаційного обладнання та вимірювального блоку. Електрична схема стенду наведена на рис. 1, а загальний вигляд стенду – на рис. 2.

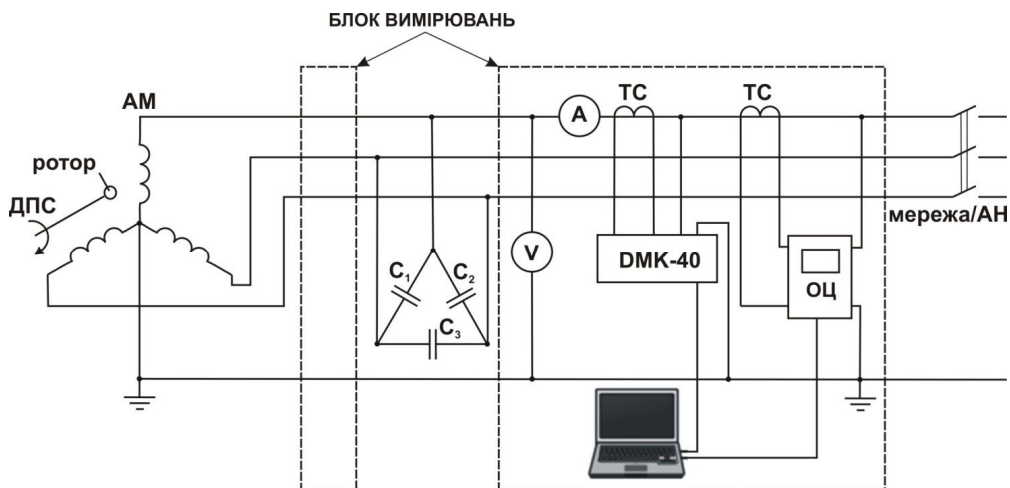


Рис. 1. Схема з'єднань лабораторного стенду.

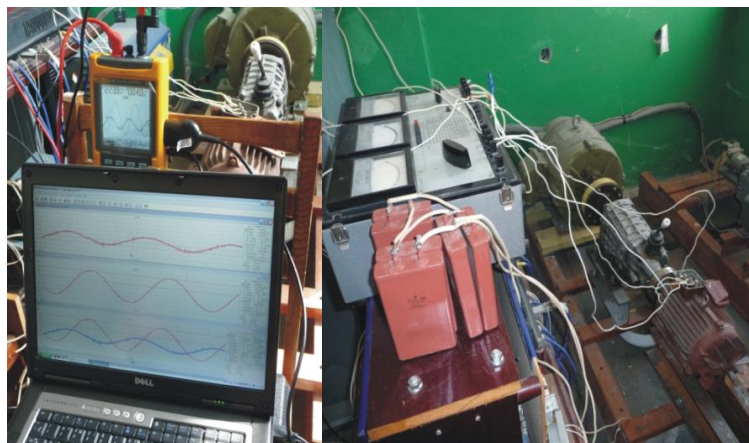


Рис. 2. Фото лабораторного стенду.

В якості АГ досліджувався серійний асинхронний двигун із короткозамкнутою обмоткою ротора типу 4АМ100L6СУ1 в генераторному режимі роботи. Номінальні дані асинхронного двигуна: $P_{ном} = 2,2$ кВт; $V = 380$ В; $I = 5,6$ А; $n = 950$ об/хв; $\cos \varphi = 0,74$; $ККД = 81\%$. Вимірювальний блок був реалізований на основі мікропроцесорного цифрового мультиметра типу DMK-40 (фірма *Lovato*, Італія) з функцією цифрового реєстратора. За його допомогою здійснювалося вимірювання і запис параметрів електроенергії. Мультиметр приєднувався до ПК (ноутбук) за допомогою інтерфейсу RS-485. Для організації передачі інформації з мультиметра вико-

ристовувалось спеціалізоване програмне забезпечення DMK-SW10 з можливістю експорту параметрів у бази даних ACCESS, EXEL. Для фіксації миттєвих значень напруги і струму впродовж періоду застосовувався цифровий осцилограф FLUKE 123.

Результати експериментальних досліджень. Вимірювання у всіх режимах роботи проводились за номінального теплового стану генератора. Здійснювалось по 20 замірів у кожному із режимів з інтервалом 10 секунд. Оброблення кожного запису виконувалось із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення мультиметра та осцилографа. Зразки оброблення сигналів наведені на рис. 3 та рис. 4.

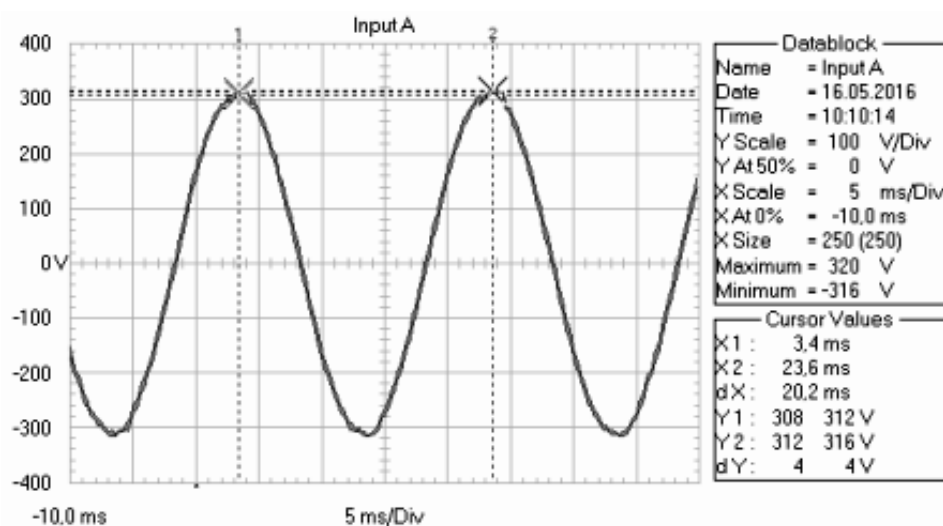


Рис. 3. Осцилограма миттєвого значення фазної напруги.

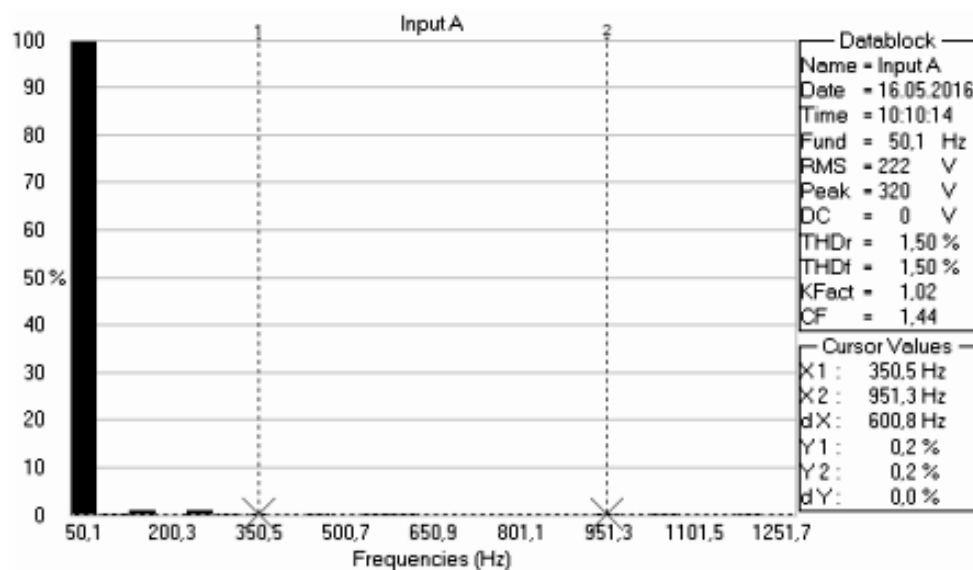


Рис. 4. Розподіл гармонійних складових напруги.

Таблиця 1. Розподіл гармонійних складових напруги та струму

Напруга, В	Струм, А	Гармонійні складові, %								
		Напруга				Струм				
		Номер гармоніки								
		2	3	4	5	2	3	4	5	6
На клеммах генератора										
400	5,88	2	3	0	0	1	3	0	1	1
Після конденсаторної батареї										
400	3,96	2	1	0	0	2	2	1	0	0

Результати одного заміру напруги та струму для автономного навантаження наведені в табл. 1 за ввімкнення вимірювального блоку на клемми генератора та після конденсаторної батареї.

В кривій напруги присутні гармонійні складові. У більшості вимірювань це 2-а та 3-я гармоніки. В деяких випадках присутні 4, 5, 6 і 7 гармоніки, які в процентному відношенні до основної гармоніки не перевищують 1%. У кривій струму наявна більша кількість гармонійних

складових, проте їх амплітудні значення не перевищують 3%.

Узагальнення отриманих результатів виконувалося згідно з методичними положеннями [11] і наведено в табл. 2, де позначено: δU – відхилення напруги; K_U – коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривої напруги. Найбільше зафіксоване значення коефіцієнта K_U в одному замірі не перевищувало 3,76%, що відповідає вимозі ГОСТ 13109-97.

Таблиця 2. Значення відхилення та коефіцієнта спотворення напруги

	Холостий хід	Автономне навантаження	Робота на мережу
$\delta U, \%$	3,03	2,48	1,45
$K_U, \%$	2,64	3,16	1,00

Висновки. Коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги асинхронного генератора з короткозамкненою обмоткою ротора та ємнісним збудженням не перевищує гранично припустимого значення 5% і не обмежує його застосування у складі малих вітро- та гідроелектричних установок.

1. *Іванов А.А.* Асинхронные генераторы для гидроэлектрических станций небольшой мощности. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 139 с.

2. *Іванов А.О., Пулатов В.Б., Тищенко О.О.* Електростанції з асинхронним генератором. – К.: Техніка, 1967. – 158 с.

3. *Лежнюк П.Д., Нікіторович О.В., Кулик В.В.* Малі гідроелектростанції з асинхронними генераторами. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 142 с.

4. *Зубков Ю.Д.* Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением. – Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1949. – 112 с.

5. *Торопцев Н.Д.* Авиационные асинхронные генераторы. – М.: Транспорт, 1970. – 104 с.

6. *Вишневский Л.В., Пасс А.Е.* Системы управления асинхронными генераторными комплексами. – К.: Лыбидь, 1990. – 168 с.

7. *Торопцев Н.Д.* Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. – М.: НТФ Энергопрогресс, 2004. – 88 с.

8. *Вольдек А.И.* Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. Учебн. Заведений. / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

9. *Геллер Б., Гамата В.* Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.

10. *Гайнцев Ю.В.* Влияние теплового состояния асинхронной машины на ее характеристики. – Электротехника, 1975, №3, с. 20-21.

11. *ГОСТ 13109-97.* Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 1.01.1999. М., 1999. 35 с.

REFERENCES

1. *Ivanov A.A.* (1948). *Asinkhronnyye generatory dlya gidroelektricheskikh stantsiy nebol'shoy moshchnosti* [The induction generators for hydroelectric plants of small-cardinality]. Moscow, Russia: Gosenergoizdat [in Russian].
2. *Ivanov A.O., Pulatov V.B., Tishchenko O.O.* (1967). *Elektrostantsii z asinkhronnim generatorom* [The power station with induction generators]. Kiev, Ukraine: Tekhnika [in Ukrainian].
3. *Lezhnyuk P.D., Nikitorovich O.V., Kulik V.V.* (2011). *Malі gidroyelektrostantsii z asinkhronnimi generatorami* [Small hydro power plants with induction generators]. – Vinnitsya, Ukraine : VNTU [in Ukrainian].
4. *Zubkov U.D.* (1949). *Asinkhronnyye generatory s kondensatornym vzbuzhdeniyem* [Induction generators with excitation capacitor]. – Almaty, Kazakhstan: Izd-vo AN KazSSR [in Russian].
5. *Toroptysev N.D.* (1970). *Aviatsionnyye asinkhronnyye generatory* [Air induction generators]. Moscow, Russia: Transport [in Russian].
6. *Vishnevskiy L.V., Pass A.E.* (1990). *Sistemy upravleniya asinkhronnymi generatornymi kompleksami* [Control systems induction generator complexes]. Kiev, Ukraine: Lybid [in Russian].
7. *Toroptysev N.D.* (2004). *Asinkhronnyye generatory dlya avtonomnykh elektroenergeticheskikh ustanovok* [Induction generators for autonomous electric power plants]. Moscow, Russia: Energoprogress [in Russian].
8. *Vol'dek A.I.* (1978). *Elektricheskkiye mashiny* [Electric motors]. Leningrad, Russia: Energiya [in Russian].
9. *Geller B., Gamata V.* (1981) *Vysshiyе garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Higher harmonics in induction machines]. Moscow, Russia: Energiya [in Russian].
10. *Gaintsev U.V.* (1975) *Vliyaniye teplovogo sostoyaniya asinkhronnoy mashiny na yeye kharakteristiki* [Influence of the thermal state of the induction machine in its characteristics]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], No. 3, 20-21 [in Russian].
11. GOST 13109-97. (1999). *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya.* [Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems .. introduced]. Moscow, Russia [in Russian].

П.Ф.Васько, докт.техн.наук, **В.М.Головко**, докт.техн.наук, **А.П.Вербовой**, канд.техн.наук (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

Высшие гармонические составляющие напряжения и тока асинхронного генератора с коротко замкнутой

обмоткой ротора в составе малых ветро- и гидроэлектрических установок

Приведены результаты экспериментальных исследований асинхронного генератора с короткозамкнутой обмоткой ротора в автономном режиме работы и при параллельной работе с промышленной электросетью. Проанализированы гармонические составляющие напряжения и тока и их соответствие гранично допустимым значениям. Библ. 11, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: асинхронный генератор, гармонические составляющие, напряжение, ток.

Vasko P., Golovko V., Verboviy A. (Institute for renewable energy at NAS of Ukraine, Kyiv)

The high harmonic components of voltage and current of the asynchronous generator with short-circuited rotor winding in small wind and hydroelectric installations

The results of experimental research of the asynchronous generator with short-circuited rotor winding in the autonomous mode of operation and in parallel operation with the industrial grid have been presented. The harmonic components of voltage and current as well as theirs compliance with the boundary permissible values has been analyzed. References 11, tables 2, figures 4.

Keywords: induction generator, harmonics, voltage, current.

SYNOPSIS

Asynchronous generators (AG) with short-circuited rotor winding and capacitive excitation are applied to convert mechanical energy to electrical energy on the turbine shaft of small wind and hydroelectric installations. Asynchronous generator is a more simple device than the synchronous counterpart, and it has a low cost. However, quality parameters of generated electricity issues, in particular, harmonic components of voltage and current require further study.

There has been analyzed the presence of high harmonic components of voltage and current, and identified the rotor eccentricity of the asynchronous generator.

The descriptions of laboratory stand for experimental study of harmonic content of voltage and current have been given in the paper. The processed results of the experimental studies have been listed in the table. According to the results of experimental studies the quality indicators of electric energy have been determined and then analyzed its compliance with existing standards.

Electric energy quality indicators of asynchronous generator with short-circuited winding meet the requirements of existing standards and do not limit its use in the small wind and hydroelectric installations.

Стаття надійшла до редакції 07.11.16

Остаточна версія 09.12.16