

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН ІЗ СУМІЩЕНИМИ ОБМОТКАМИ ЯК ГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ МАЛИХ ГЕС

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Виконано аналіз та визначено оптимальні параметри для ефективної роботи гідротурбін на малих ГЕС. Досліджено особливості функціонування асинхронних машин із суміщеними обмотками. Запропоновано використання асинхронних машин із суміщеними обмотками як генераторів та побудовано відповідні характеристики.*

**Ключові слова:** асинхронна машина, гідротурбіна, суміщені обмотки, малі ГЕС, механічні характеристики.

### Вступ

Використання асинхронних машин як генераторів на малих ГЕС зумовлює необхідність дослідження режимів їх роботи та пошук методів покращення масогабаритних та техніко-економічних показників. Врахування режимів ефективної роботи гідротурбін та генераторів дозволяє покращити якість генерованої електроенергії. Одним з шляхів підвищення ефективності роботи малих ГЕС є використання асинхронних машин із суміщеними обмотками як генераторів.

*Метою роботи є дослідження роботи асинхронних машин із суміщеними обмотками та перспективи їх застосування як генераторів на малих ГЕС.*

### Результати досліджень

Потужність на валу гідротурбіни залежить від напору й витрати води, а також частоти обертання [1]

$$P_T = \gamma \frac{QH}{\omega} \eta_T, \quad (1)$$

де  $\gamma$  — вага одиниці об'єму води;  $Q$  — витрата води;  $H$  — робочий напір;  $\omega$  — кутова частота обертання;  $\eta_T$  — ККД турбіни. Ця залежність для турбіни К-245 [1] показана на рис. 1.

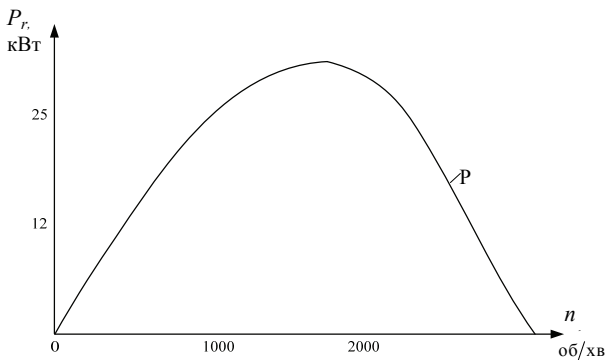


Рис. 1. Характеристики нерегульованої гідротурбіни К-245

Максимальна потужність досягається лише за певних обертів турбіни, що спричиняє ускладнення в роботі електростанції. Зокрема, у разі зміни навантаження генератора буде змінюватися момент на валу турбіни. Зміна моменту приведе до зміни частоти обертання, що негативно вплине на якість електроенергії та коефіцієнт корисної дії установки. На режим роботи гідроагрегату також впливають коливання енергії потоку води, що зумовлено зовнішніми чинниками, тому в конструкцію додатково включаються регульовані направляючі пристрої, а це підвищує її вартість та погіршує економічні показники. Для зменшення вартості та спрощення конструкції як гідротурбіни використовуються відцентрові або осьові насоси [2]. Недоліком такого конструктивного рішення є відсутність регулювання витрати води та зміна робочих характеристик через перехід насоса в турбінний режим.

Рівняння механічного моменту турбіни та генератора можна записати у вигляді [1]

$$M_T = M_G + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

де  $M_T$  — механічний момент турбіни;  $M_G$  — механічний момент генератора;  $J$  — момент інерції обертових частин;  $\omega$  — кутова частота обертання.

Співвідношення параметрів генератора визначається за виразом [1]

$$\frac{D^2 l_\delta \omega}{P} = \sigma \frac{1}{A \cdot B_\delta}, \quad (3)$$

де  $D$  — внутрішній діаметр статора електричної машини;  $P$  — потужність;  $l_\delta$  — розрахункова довжина повітряного зазору генератора;  $A$  — лінійне навантаження;  $B_\delta$  — магнітна індукція в повітряному зазорі,  $\sigma$  — коефіцієнт пропорційності.

В діапазоні потужностей до 100 кВт доцільно використовувати асинхронні генератори [3]. Завдяки спрощеній конструкції ротора, цей тип машин має кращі масогабаритні та експлуатаційні показники. Режими роботи асинхронної машини визначаються її механічною характеристикою, показаною на рис. 2 [3, 11].

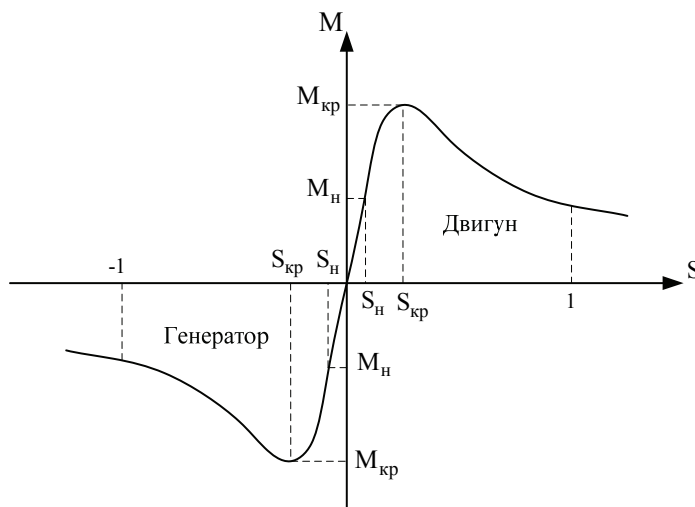


Рис. 2. Механічна характеристика асинхронної машини

З рис. 2 випливає, що як в режимі двигуна, так і в режимі генератора, момент на валу машини  $M$  нелінійно залежить від ковзання  $s$ . В режимі генератора асинхронна машина працює з найбільшою потужністю лише на невеликому відрізку характеристики. Подальше збільшення навантаження призводить до зростання ковзання та підвищення реактивної складової струму ротора. Як наслідок, порушується режим роботи машини, а її ККД різко падає. Подібна ситуація відбувається і у разі порушення режиму роботи гідротурбіни. Це свідчить про те, що необхідно забезпечити встановлення регулювальних пристроїв для турбіни і для генератора. Також на етапі проектування можна підібрати обладнання з максимально ефективними параметрами без регуляторів, проте ККД установки буде змінюватися залежно від випадкових зовнішніх факторів. Обидва варіанти, маючи певні переваги, все ж приведуть до погіршення техніко-економічних показників обладнання.

Підвищити ефективність перетворення енергії можна за допомогою використання асинхронних генераторів із суміщеними обмотками. Завдяки удосконаленій конструкції, ці генератори працюють з високим коефіцієнтом корисної дії у великому діапазоні навантажень, що дозволяє ефективніше перетворювати енергію гідротурбіни в різних режимах роботи.

Обертове магнітне поле статора індукуює в обмотці ротора струм, що містить складові вищих гармонік. Напруженість магнітного поля обмотки ротора визначається за виразом [4]

$$H(\alpha, t) = \frac{Z_2 \cdot \sqrt{2} \cdot I}{p\pi\delta} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu} \cdot \sin\left(\nu \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin(\omega t - \nu\alpha), \quad (4)$$

де  $Z_2$  — число пазів ротора;  $I$  — струм обмотки ротора;  $p$  — число пар полюсів;  $\delta$  — величина повітряного зазору;  $\nu$  — номер гармоніки;  $\alpha$  — кут повороту ротора відносно осі статора.

Номер гармоніки визначається за виразом [4]

$$\nu = c \cdot \frac{Z}{p} \pm 1, \quad (5)$$

де  $c = 0, 1, 2, 3 \dots n$ .

Розподіл магнітного поля в зазорі машини набуде форми ступінчастої синусоїди, що приводить до наявності вищих гармонік. Це створює додатковий гальмівний момент, приводить до нагрівання обмоток та підвищення рівня вібрації. Виконаємо розділення котушок ротора на каскадні групи [5, 6]. ЕРС кожної секції визначається як різниця ЕРС стрижнів, з яких складається секція [6]

$$E_c = e_{ct} - e_{ct+y} = B_m \cdot \sin\left(2\pi \frac{1}{T} \cdot t\right) - B_m \cdot \sin\left(2\pi \frac{1}{T}(t+y)\right), \quad (6)$$

де  $e_{ct}$ ,  $e_{ct+y}$  — ЕРС стрижнів, з яких складається секція обмотки;  $T$  — величина подвійного полюсного ділення;  $t$  — номер паза, в якому лежить стрижень обмотки;  $y$  — крок секції обмотки;  $B_m$  — амплітудне значення магнітної індукції.

ЕРС стрижня визначається за формулою [6]

$$e_{ct} = B_m \cdot \sin \omega t = B_m \cdot \sin\left(2\pi \frac{1}{T} \cdot t\right), \quad (7)$$

$$T = \frac{Z}{p}. \quad (8)$$

Далі визначаємо МРС та струми секцій [6]

$$F_c = \sqrt{2} I_c W \cdot \sin\left(\omega t - \frac{t \cdot \pi}{\tau}\right), \quad (9)$$

де  $I_c$  — діюче значення струму секції;  $W$  — число витків секції.

$$I_c = \frac{E_c}{Z_c}, \quad (10)$$

де  $Z_c$  — повний опір секції.

Знаходимо значення МРС для кожної гармоніки [6]

$$F_{vc} = \sum_{v=1}^{\infty} 2F_c \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi v T_0}{T}\right)}{\pi \cdot v} \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot v}{T} \cdot x\right), \quad (11)$$

де  $T_0$  — крок секції;  $x$  — змінна просторова координата.

Визначаємо МРС з урахуванням просторового зсуву між секціями [6]

$$F_{vct,t+y} = \sum_{v=1}^{\infty} 2 \cdot \sqrt{2} I W \cdot \sin\left(\omega t - \frac{t\pi}{\tau}\right) \frac{\sin\left(\frac{\pi v T_0}{T}\right)}{\pi v} \cos\left(\frac{2\pi v}{T} x - \frac{t\pi}{\tau}\right). \quad (12)$$

Таким чином, суміщена каскадна обмотка створює магнітне поле такої конфігурації, що основні складові вищих гармонік магнітного поля взаємокомпенсуються. Це дає можливість мінімізувати втрати у магнітопроводі машини [7].

Використання суміщених обмоток дозволяє суттєво покращити форму магнітного поля не тільки за рахунок зменшення впливу вищих гармонік, але й через загальне збільшення взаємодії обмоток та магнітопроводу машини [8, 9, 10]. Це в свою чергу сприяє збільшенню потужності на валу без зміни масогабаритних показників.

Зміна конфігурації стандартних обмоток також дозволяє використовувати обмотки з меншою кількістю витків, що зменшує омичні втрати в провідниках та втрати на нагрівання магнітопроводу. Разом з тим, для ефективного заповнення паза використовуються провідники з більшою площею поперечного перерізу, що дозволяє збільшити момент на валу машини. Покращується коефіцієнт потужності за рахунок перерозподілу реактивних струмів в обмотках та зменшення впливу вищих гармонік в магнітних колах машини.

Таким чином, розглянутий тип асинхронних машин доцільно використовувати як генератори на малих ГЕС. Це пояснюється, в першу чергу, їхніми механічними характеристиками. Такі машини можуть працювати в широкому діапазоні механічних та електричних навантажень без суттєвого

зниження коефіцієнта корисної дії. Варто також відмітити покращення масогабаритних показників на одиницю потужності. Це дозволяє використовувати як генератор машину з полегшеним ротором. Високий коефіцієнт потужності цих машин дозволяє зменшити протікання реактивних струмів та підвищити якість електричної енергії.

### Висновки

Проведено дослідження характеристик роботи гідротурбін та визначено основні вимоги до генераторів.

Досліджено особливості роботи асинхронних машин із суміщеними обмотками та побудовано їхні характеристики. На основі результатів досліджень запропоновано використовувати асинхронні машини із суміщеними обмотками як генератори для малих ГЕС.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лукутин Б. В. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций : монография / Б. В. Лукутин, С. Г. Обухов, Е. Б. Шандарова. — Томск : ТПУ, 2001. — 104 с.
2. Чернюк А. М. Анализ и оптимизация состава оборудования малых ГЭС для автономного энергоснабжения военных объектов и инфраструктуры / А. М. Чернюк // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. — 2015. — Вип. 4. — С. 124—129.
3. Артюх С. Ф. Экономические аспекты применения АГ на мини ГЭС мощностью до 1000 кВт / С. Ф. Артюх, А. Ю. Мезеря, Д. В. Ириков // Світлотехніка та електроенергетика. — 2008. — № 3. — С. 68—72.
4. Вавилов В. Е. Исследование магнитного поля реакции ротора асинхронного электродвигателя / В. Е. Вавилов, И. Ф. Саяхов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2016. — № 1.
5. Иваненко В. С. Роторна суміщена обмотка / В. С. Иваненко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск, 2012. — Вип. 36. — С. 444—450.
6. Лущик В. Д. Асинхронный каскадный двигун з суміщеною фазною обмоткою на роторі / В. Д. Лущик, В. С. Иваненко, В. Д. Карапка // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск, 2009. — Вип. 28. — С. 390—397.
7. Есенов И. Х. Результаты реконструкции обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя / И. Х. Есенов, Н. И. Байдасов // Известия Горского государственного университета. — 2015. — Вип. 52. — С. 214—218.
8. Kasten H. Electrical Machines with Higher Efficiency through Combined Star-Delta Windings / H. Kasten, W. Hofmann // Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). — 2011.
9. Nanoty A. Design, Development of Six Phase Squirrel Cage Induction Motor and its Comparative Analysis with Equivalent Three Phase Squirrel Cage Induction Motor / A. Nanoty, A. R.Chudasama // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. — August 2013. — Volume 3, Issue 8.
10. Schreier L. Analysis of properties of induction machine with combined parallel star-delta stator winding / L. Schreier, J. Bendl, M. Chomat // Maszyny Elektryczne — Zeszyty Problemowe. — Nr 1/2017.
11. Брускин Д. Э. Электрические машины и микромашины. / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. — М. : Высшая школа, 1971. — 432 с.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.10. 2017

**Михайлюк Олег Борисович** — аспірант кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, e-mail: olegmm12@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**О. В. Mykhailiuk<sup>1</sup>**

## Perspectives of Using Asynchronous Machines with Combined Stator Windings as Generators for Small Hydro Power Plants

<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University

*The analysis and the optimal parameters for the effective operation of hydro turbines at small hydroelectric power stations have been determined. The features of operation of asynchronous machines with combined windings have been investigated. The use of asynchronous machines with combined windings as generators has been proposed and the corresponding characteristics were determined.*

**Keywords:** asynchronous machine, hydro turbine, combined winding, small hydropower plants, mechanical characteristics.

*Mykhailiuk Oleh B.* — Post-Graduate Student the Chair of Renewable Energy and Transportation Systems and Electrical Complexes, e-mail: olegmm12@gmail.com

**О. Б. Михайлюк<sup>1</sup>**

## **Перспективы использования асинхронных машин с совмещенными обмотками в качестве генераторов для малых ГЭС**

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Выполнен анализ и определены оптимальные параметры для эффективной работы гидротурбин на малых ГЭС. Исследованы особенности функционирования асинхронных машин с совмещенными обмотками. Предложено использование асинхронных машин с совмещенными обмотками в качестве генераторов и построены соответствующие характеристики.*

**Ключевые слова:** асинхронная машина, гидротурбина, совмещенные обмотки, малые ГЭС, механические характеристики.

*Михайлюк Олег Борисович* — аспирант кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, e-mail: olegmm12@gmail.com