

ВЕНТИЛЬНІ ІНДУКТОРНІ ГЕНЕРАТОРИ РАДІАЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ З СУМІЩЕНИМИ ОБМОТКАМИ

Описана конструкція та принцип дії індукторних генераторів з суміщеними обмотками. Приведено теоретичне обґрунтування переваг розглянутих генераторів. Наведені дані експериментальних досліджень генераторів з суміщеними обмотками і, для порівняння, генераторів, що серійно виготовляються.

Описана конструкция и принцип действия индукторных генераторов с совмещенными обмотками. Приведено теоретическое обоснование преимуществ рассматриваемых генераторов. Приведены данные экспериментальных исследований генераторов с совмещенными обмотками и, для сравнения, генераторов, которые изготавливаются серийно.

Серед безконтактних електричних генераторів найбільшого поширення набули генератори індукторного типу завдяки простоті конструкції, надійності в роботі та невисокої ціни. Індукторні генератори знайшли широке застосування на тракторах, вантажних автомобілях, сільгоспмашинах, на вітроелектростанціях, на залізничному транспорті як підвагонні генератори. Однак більш широке поширення їх стримується із-за невисоких масогабаритних питомих показників. Вага їх порівняно з контактними генераторами в два рази більша.

Зарубіжні і вітчизняні вчені та конструктори-дослідники удосконалюють уже відомі типи індукторних генераторів, не вносячи ніяких принципових змін у конструкцію та принцип дії [1-3].

Істотного покращення масогабаритних показників індукторних генераторів можливо досягти, якщо сумістити обмотку збудження з обмоткою якоря. Для цього магнітопровід індукторного генератора потрібно змінити таким чином, щоб обмотка збудження знаходилася на тих же зубцях статора, що і обмотка якоря.

Обмотка збудження повинна бути також узгоджена з трифазною обмоткою якоря. Мінімальне число зубців якоря, на яких можливо утворити трифазну обмотку, дорівнює трьом. З огляду на те, що ці ж зубці повинні утворювати магнітне поле збудження, їх число повинно бути парним. Тому мінімально можливе число зубців на статорі $Z_1 = 6$. При $Z_1 = 6$ кожна пара зубців статора є окремою фазою. Також кожна пара зубців статора утворює магнітний потік збудження. Тому статор із $Z_1 = 6$ буде мати шестиполосний магнітний потік збудження. $2p = 6$ – мінімально можливе число полюсів збудження в розглядуваному індукторному генераторі.

Число зубців ротора Z_2 повинно бути парним, щоб, по-перше, не було одностороннього магнітного притягування і, значить, магнітних вібрацій; по-друге, для збільшення величини пульсацій магнітного потоку в фазах: в певну мить часу під парою зубців статора, що є фазою, повинні розміщуватись зубці ротора, в слідує мить, через півперіоду – пази ротора. Цю умову можливо виконати, якщо Z_2 є парним.

Для більш раціонального використання магнітопроводу статора та ротора важливо, щоб Z_2 як можна менше відрізнялось від Z_1 . Найкраще підходить $Z_2 = 8$.

Для того, щоб досягалась максимально можлива пульсація, необхідно щоб

$$b_{z1} < b_{п12}, \quad b_{z2} < b_{п11},$$

де b_{z1}, b_{z2} – ширина зубця статора і відповідно ротора, $b_{п11}, b_{п12}$ – ширина паза статора і відповідно ротора.

Був виготовлений індукторний генератор, габарити і маса якого були такі ж, як і в серійного автомобільного генератора 37.3701(ВАЗ 2108). Зовнішній діаметр статора $D = 124$ мм (рис. 1), внутрішній діаметр – $D_i = 81$ мм, ширина зубців і пазів $b_{z1} = 15$ мм, $b_{z2} = 14,6$ мм, $b_{п11} = 27,4$ мм, $b_{п12} = 17$ мм.

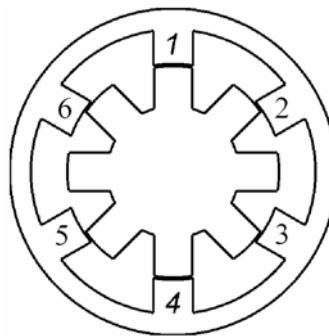


Рис. 1. Магнітопровід генератора, $Z_1 = 6, Z_2 = 8$

Довжина пакета статора і ротора $l_b = 48$ мм, але загальна вага статора і ротора залишились такою ж, як і в серійному генераторі за рахунок значно меншої ваги ротора, відсутності контактних кілець і щіток. На зубцях 1,4 розміщені котушки фази А, на зубцях 3,6 – фази В, на зубцях 5,2 – фази С.

Фази якорної обмотки з'єднані в трикутник, при цьому в фазах якорної обмотки послідовно та узгоджено з іншими фазами ввімкнуті діоди (рис. 2). На один із діодів подають напругу від джерела постійного струму (рис. 3), з тим щоб струм збудження протікав по всім фазам якорної обмотки.

При навантаженні в фазах якорної обмотки протікає однопівперіодний випрямлений струм. Магнітний потік реакції якоря можна вважати такою ж формою, що і струм, який його створює.

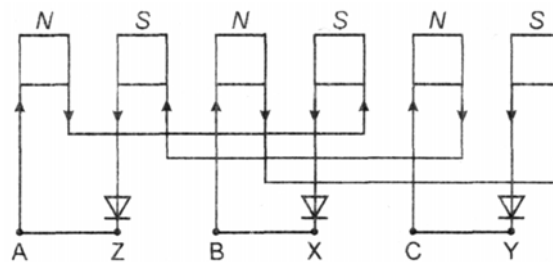


Рис. 2. Схема обмотки

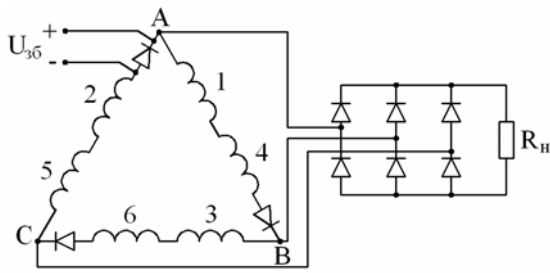


Рис. 3. Схема вмикання навантаження

Однопівперіодний випрямлений струм, якщо розкласти його в ряд Фур'є, має постійну складову і в два рази меншу основну гармонічну складову. Основна гармонічна складова магнітного потоку реакції якоря буде в 2 рази менша магнітного потоку реакції якоря, створеного синусоїдним струмом такої ж діючої величини, що і однопівперіодний випрямлений струм. Тому в 2 рази зменшуються індуктивні опори x_d та x_q відповідно поздовжня ЕРС реакції якоря E_d та поперечна ЕРС реакції якоря E_q . Жорсткість зовнішньої характеристики генератора завдяки діодам різко зростає.

Магнітний потік реакції якоря, створений однопівперіодним випрямленим струмом, направлений узгоджено з магнітним потоком, створеним обмоткою збудження, що теж сприяє збільшенню жорсткості зовнішньої характеристики.

Ще більш кращі масогабаритні і енергетичні показники показує генератор, статор якого має гребінкову зубцеву зону [6]. Статор в такому випадку має 12 зубців, а ротор – 14 зубців (рис. 4). Число полюсів збудження залишається незмінним. Завдяки гребінковій зубцевій зоні статора частота ЕРС якірної обмотки, яка залежить від швидкості обертання n та числа зубців ротора $Z_2, f_2 = nZ_2$, зростає в 1,75 рази.

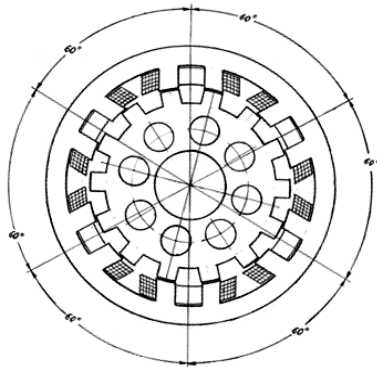


Рис. 4. Генератор з гребінковою зубцевою зоною, $Z_1 = 12, Z_2 = 14$

Важливим фактором в покращенні процесу електромагнітного перетворення енергії є незначна різниця між числами пазів статора $Z_1 = 12$ і ротора $Z_2 = 14$. Малі зубці статора мають ширину $b_{z1} = 7,8$ мм, а паз між ними $- b_{п1} = 11,4$ мм. На рис. 5 показані магнітопроводи статора і ротора, а на рис. 6 – статор з обмоткою.

Завдяки більш раціональному співвідношенню розмірів зубцевої зони статора пульсації магнітного потоку в генераторі з числом зубців $Z_1 = 12$ і $Z_2 = 14$ зображуються у вигляді однопівперіодних синусоподібних імпульсів (рис. 7), які можна розкласти в ряд Фур'є з допомогою періодичної функції $f(x)$ з періодом T



Рис. 5. Фото магнітопроводу статора та ротора



Рис. 6. Статор з обмоткою



Рис. 7. Пульсації магнітного потоку, $Z_1 = 12, Z_2 = 14$

$$f(x) = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega x - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\cos 2\omega x}{1 \cdot 3} + \frac{\cos 4\omega x}{3 \cdot 5} + \frac{\cos 6\omega x}{5 \cdot 7} + \dots \right).$$

При $x = \frac{T}{4}$ $y = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2}$, тобто

магнітний потік має постійну складову $1/\pi$ і в два рази меншу основну гармонічну.

В генераторі з числом зубців $Z_1 = 6$ і $Z_2 = 8$ пульсації відбуваються із значно більшим проміжком. Ширина паза $b_{п1} = 27,4$ мм майже в 2 рази перевершує ширину зубця $b_{z1} = 15$ мм. Пульсації магнітного потоку у вигляді імпульсів шириною $T/3$ і проміжком між ними $2T/3$ зображені на рис. 8.

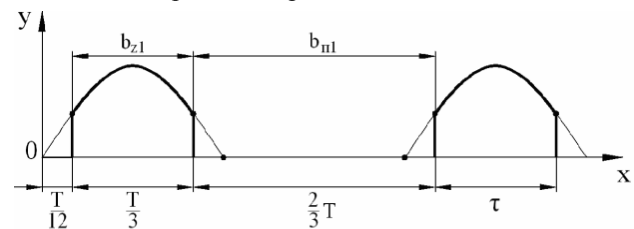


Рис. 8. Пульсації магнітного потоку, $Z_1 = 6, Z_2 = 8$

Періодична функція $f(x)$ з періодом T для цього випадку

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (\alpha_k \cos k\omega x + b_k \sin k\omega x),$$

де

$$a_k = \frac{2\omega_0}{T} \cdot \frac{1 + \cos k\omega\tau}{\omega_0^2 - k^2\omega^2}, b_k = \frac{2\omega_0}{T} \cdot \frac{\sin k\omega\tau}{\omega_0^2 - k^2\omega^2}, (k = 1, 2, \dots),$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{2\tau}{\pi T}, \omega_0 = \frac{\pi}{\tau}, \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Згідно з рис. 8 $\tau = T/2$. В результаті одержуємо для $k = 1$

$$y = \frac{2}{3\pi} + \frac{9}{5\pi} \cos \omega x + \frac{3\sqrt{3}}{5\pi} \sin \omega x.$$

При $x = T/4$ $y = \frac{2}{3\pi} + \frac{3\sqrt{3}}{5\pi}$, тобто магнітний потік має постійну складову $2/3\pi$ і основну гармонічну, яка дорівнює $\frac{3\sqrt{3}}{5\pi} = 0,331$.

В генераторі із співвідношенням пазів $Z_1 = 6$ і $Z_2 = 8$ основна гармонічна магнітного потоку зменшується в $0,5/0,331 = 1,51$ рази порівняно з генератором з гребінковою зубцевою зоною.

В табл. 1 приведені результати експериментальних досліджень індукторних генераторів з суміщеними обмотками при швидкості обертання ротора $n = 5000$ об/хв., а також, для порівняння, серійного індукторного генератора Г-306 та автомобільного синхронного генератора з контактними кільцями. Маса всіх досліджуваних генераторів приблизно однакові – 4,2 кг.

Таблиця 1
Результати експериментальних досліджень генераторів при швидкості обертання ротора $n = 5000$ об/хв

Тип генератора	U_d	I_d	P_d	$U_{зб}$	$I_{зб}$	$P_{ма}$	η	G_m
	В	А	Вт	В	А	Вт	%	грам
Індукторний $Z_1 = 6, Z_2 = 8$	190	3,95	750	18,5	4,6	14	77,5	470
Індукторний $Z_1 = 12, Z_2 = 14$	199	4,57	910	18,7	4,8	18	78,25	340
Індукторний Г-306	14	28,6	400	13	5	49	66,8	700
Автомобільний синхронний	13,64	55	750	13	5	662	47	560

Коефіцієнт корисної дії генераторів вираховувався за формулою

$$\eta = \frac{P_d}{P_d + P_{ма} + P_{ст} + P_{мех}} \cdot 100\%$$

Як можна бачити із табл. 1, індукторні генератори з суміщеними обмотками мають кращі показники порівняно з індукторними генераторами серійного виконання по всім параметрам: питомому показнику кг/кВт (масогабаритному показнику), коефіцієнту корисної дії, питомій витраті міді. Кращі показники і в порівнянні з автомобільним синхронним генератором, який має контактні кільця, щітки і обмотку збудження на роторі.

Оскільки в автомобільних генераторах струм збудження і якірний струм відрізняються на порядок, об'єднання обмоток в таких генераторах нерациональне. МРС збудження буде на порядок меншою за потрібну.

Індукторні генератори шестиполусного збудження і з діодами в фазах якірної обмотки, з'єднаної в трикутник, у випадку виготовлення двох окремих обмоток втрачають потужність до 30 %. Такі генератори переважають по всім показникам індукторні генератори серійного виконання, але поступаються синхронним генераторам з контактними кільцями по масогабаритному показнику, який автомобілебудівники вважають найважливішим.

ВИСНОВКИ

1. Сконструйовано, виготовлено і досліджено декілька експериментальних зразків вентильного індукторного генератора радіального збудження принципово нової конструкції: на зубцях статора розміщені концентричні котушки якірної обмотки і котушки обмотки збудження, які можуть суміщуватись з якірною обмоткою.

2. Завдяки кращим масогабаритним показникам та більш високому ККД досліджені вентильні індукторні генератори з окремими обмотками можуть бути використані для застосування на тракторах, сільгоспмашинах, будівельних машинах, на важких автомобілях – скрізь, де на теперішній час використовують вентильні індукторні генератори традиційного конструкції.

3. Експериментальні вентильні індукторні генератори з суміщеними обмотками переважають за своїми основними показниками синхронні машини з контактними кільцями, і тому можуть бути рекомендовані в серійне виробництво як підвагонні генератори залізничних вагонів, для літальних апаратів, для вітроелектроустановок, для гідроелектростанцій невеликої потужності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Петренко А.Н. Методика расчета геометрии и параметров активной зоны одноименнополюсных индукторных автотракторных генераторов // Вестник НТУ "ХПИ". – 2005. – №5.
- Ваткин В.А. Разработка вентильных индукторных электромеханических систем автотракторного назначения: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты". – Москва, 2007. – 20 с.
- Шлегель А.О. Повышение надежности электромеханических систем автотракторного генератора: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты". – Самара, 2007. – 20 с.
- Лушчик В.Д. Патент № 86352 Україна. Індукторний трифазний різнополюсний вентильний генератор. Опубл. 27.04.09, Бюл. №8.
- Лушчик В.Д. Трифазні вентильні індукторні генератори з суміщеною обмоткою // Матеріали міжн. науч.-техн. конф. "Проблеми підвищення електромеханічних преобразователів в електромеханічних системах", Севастополь: СевНТУ, 2010. – С. 25-27.
- Лушчик В.Д. Патент № 98261 Україна. Індукторний трифазний різнополюсний вентильний генератор. Опубл. 25.04.12. Бюл. №8.

REFERENCES: 1. Petrenko A.N. Method of calculating the geometry and parameters of the core homopolar inductor automotive generators. *Visnyk NTU "KhPI"* – Bulletin of NTU "KhPI", 2005, no.5. 2. Vatin V.A. *Razrabotka ventil'nykh induktornykh elektromekhanicheskikh sistem avtotraktornogo naznacheniiia*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Development of valve inductor electromechanical systems autotractor destination. Abstracts of cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2007. 20 p. 3. Shlegel' A.O. *Povysheniye nadezhnosti elektromekhanicheskikh sistem avtotraktornogo generatora*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Improving the reliability of electromechanical systems autotractor generator. Abstracts of cand. tech. sci. diss.]. Samara, 2007. 20 p. 4. Lushchik V.D. *Induktornyj tryfaznyj rznopoljussnyj ventyl'nyj generator* [Three-phase inductor had polar valve generator]. Patent UA, no.86352, 2009. 5. Lushchik V.D. Three-phase valve inductor generators with combined winding. *Materialy mezhd. nauchn.-tekh. konf. "Problemy povysheniia elektromekhanicheskikh preobrazovatelei v elektromekhanicheskikh sistemakh"* [Materials Int. sci.-techn. conf. "Problems of increase of electromechanical transducers in electromechanical systems"]. Sevastopol, SevNTU, 2010, pp. 25-27. 6. Lushchik V.D. *Induktornyj tryfaznyj rznopoljussnyj ventyl'nyj generator* [Three-phase inductor had polar valve generator]. Patent UA, no.98261, 2012.

Надійшла (received) 25.09.2014

Лушчик В'ячеслав Данилович, д.т.н., проф.,

Національний університет біоресурсів

і природокористування України,

03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 12, корпус 8,

тел./phone +38 099 7654495, e-mail: V.D.Luschik@yandex.ua

V.D. Lushchik

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

12, Heroyiv Oborony Str., Build 8, Kiev, 03041, Ukraine

Valve induction generators of radial excitation with combined windings.

The design and principle of operation of inductor generators with combined windings are described. The theoretical substantiation of advantages of considered generators is presented. The data of experimental investigations of generators with combined windings and, for comparison, generators, which are made in series are presented.

Key words – type of generators, combined winding, magnetic circuit, experimental research.