

*д.т.н. Лущик В. Д.
(ДонДТУ, Алчевськ, Україна)*

ІНДУКТОРНІ ГЕНЕРАТОРИ 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.

Ключові слова: індукторні генератори, суміщені обмотки, магнітопровід, експериментальні дослідження.

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 сериями.

Ключевые слова: индукторные генераторы, совмещенные обмотки, магнитопровод, экспериментальные исследования.

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 та сільгоспмашинах, на вітроелектростанціях, на залізничному транспорті як підвагонні генератори. Однак більш широке поширення їх стримується із-за невисоких 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 [1,2,3].

Істотного покращення масогабаритних показників індукторних генераторів можливо досягнути, 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 шестиполіусний магнітний потік збудження. $2p=6$ – мінімально можливе число полюсів збудження в розглядуваному індукторному генераторі.

Число зубців ротора Z_2 повинно бути парним. Це потрібно, 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 слідуючу 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

$$b_{Z1} < b_{П2}, b_{Z2} < b_{П1},$$

де b_{Z1} , b_{Z2} – ширина зубця статора і відповідно ротора,

$b_{П1}$, $b_{П2}$ – 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 $D=124\text{мм}$ (рисунок 1), внутрішній діаметр – $D_i=81\text{мм}$, ширина зубців і пазів $b_{Z1}=15\text{мм}$, $b_{Z2}=14,6\text{мм}$, $b_{П1}=27,4\text{мм}$, $b_{П2}=17\text{мм}$.

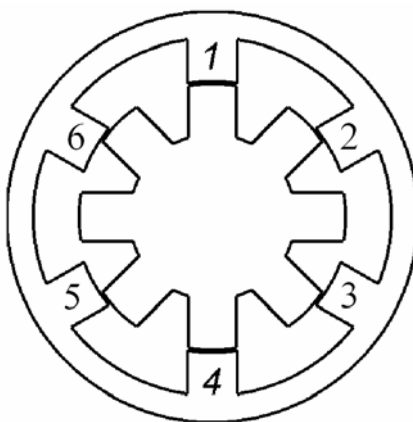


Рисунок 1 - Магнітопровід генератора, $Z_1=6$, $Z_2=8$

Довжина пакета статора і ротора $l_b=48\text{мм}$, 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.

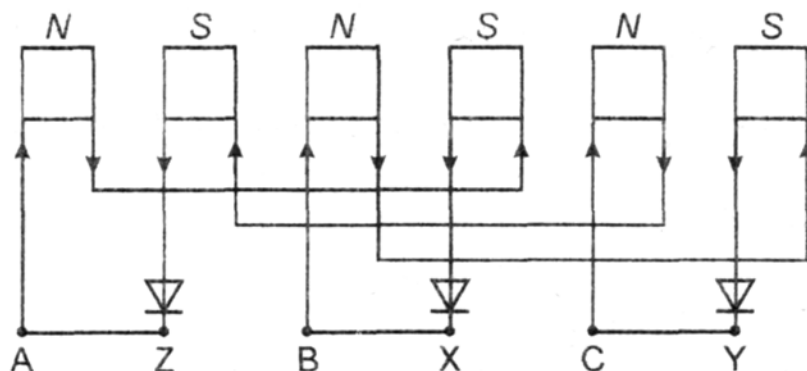


Рисунок 2 – Схема обмотки

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

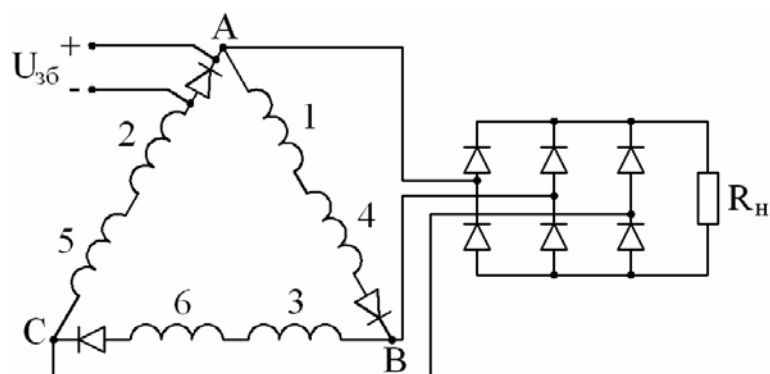


Рисунок 3 – Схема вмикання навантаження

При навантаженні в фазах якірної обмотки протікає однопівперіодний випрямлений струм. Магнітний потік реакції якоря можна вважати такої ж форми, що і струм, який його створює.

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 і 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. Статор в такому випадку має 12 зубців, а ротор – 14 зубців (рисунок 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.

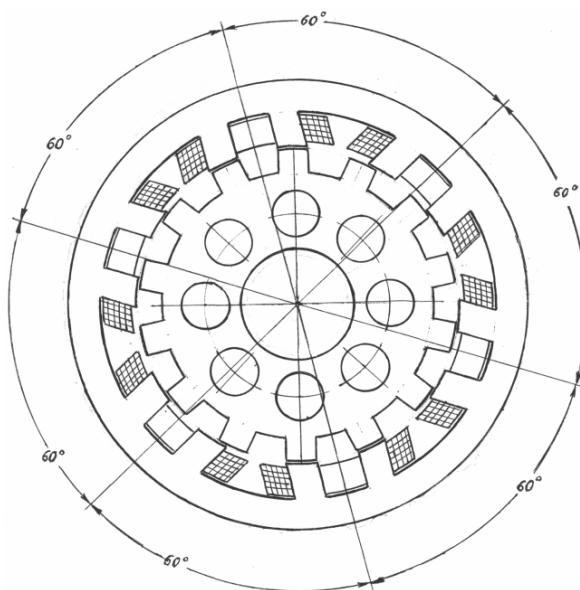


Рисунок 4 - Генератор з гребінковою зубцевою зоною, $Z_1=12$, $Z_2=14$

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 рисунку 5 показані магнітопроводи статора і ротора, а на рисунку 6 – статор з обмоткою.



Рисунок 5 – Фото магнітопроводу статора та ротора

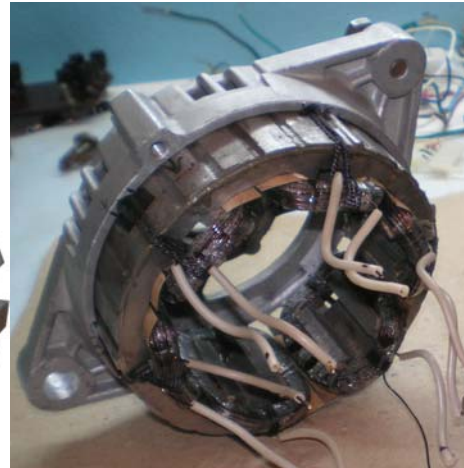


Рисунок 6 – Статор з обмоткою

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 (рисунок 7), які можна розкласти в ряд Фур'є з допомогою періодичної функції $f(x)$ з періодом T

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

При

$$x = \frac{T}{4}$$

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

тобто магнітний потік має постійну складову $\frac{1}{\pi}$ і в два рази меншу основну гармонічну.

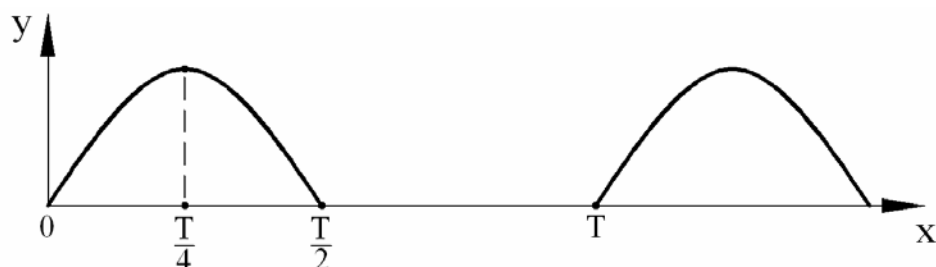


Рисунок 7 – Пульсації магнітного потоку, $Z_1=12$, $Z_2=14$

В генераторі з числом зубців $Z_1=6$ і $Z_2=8$ пульсації відбуваються із значно більшим проміжком. Ширина паза $b_{\text{п1}}=27,4\text{мм}$ майже в 2 рази перевершує ширину зубця $b_{z1}=15\text{мм}$. Пульсації магнітного потоку у вигляді імпульсів шириною $\frac{1}{3}T$ і проміжком між ними $\frac{2}{3}T$ зображені на рисунку 8.

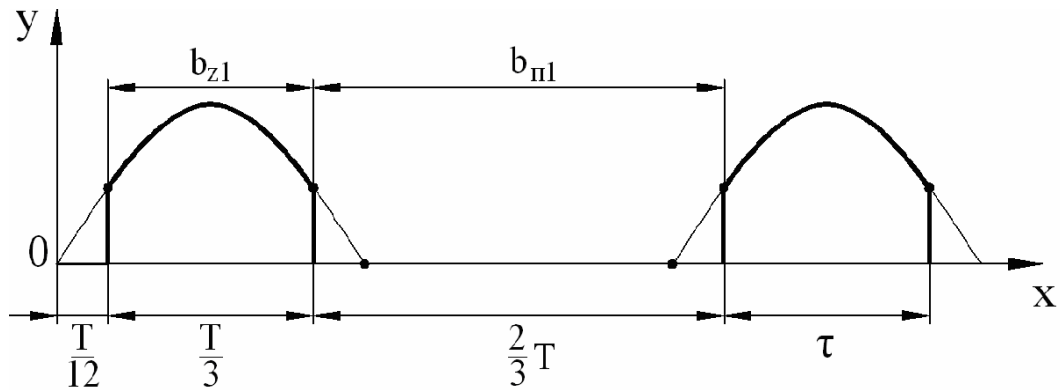


Рисунок 8 – Пульсації магнітного потоку, $Z_1=6$, $Z_2=8$

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

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

Згідно з рисунком 8 $\tau = \frac{1}{3}T$. В результаті одержуємо для $k=1$

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

При $x = \frac{T}{4}$ $y = \frac{2}{3\pi} + \frac{3\sqrt{3}}{5\pi}$, тобто магнітний потік має постійну

складову $\frac{2}{3\pi}$ 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 таблиці 1 приведені результати експериментальних досліджень індукторних генераторів з суміщеними обмотками при швидкості обертання ротора $n=5000\text{об/хв.}$, а також, для порівняння, серійного індукторного генератора Г-306 та автомобільного синхронного генератора з контактними кільцями. Маса всіх досліджуваних генераторів приблизно однакові – 4,2кг.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень генераторів при швидкості обертання ротора $n=5000\text{об/хв.}$

Тип генератора	U_d	I_d	P_d	$U_{зб}$	$I_{зб}$	$P_{зб}$	U_l	U_ϕ	I_ϕ	$P_{2\sim}$	$P_{ма}$	$P_{ст.}$	$P_{мех}$	η	G_m
	В	А	Вт	В	А	Вт	В	В	А	Вт	Вт	Вт	Вт	%	грам
Індукторний $Z_1=6, Z_2=8$	190	3,95	750	18,5	4,6	85	140,6	140,6	1,86	784	14	110	60	77,5	470
Індукторний $Z_1=12, Z_2=14$	199	4,57	910	18,7	4,8	90	147,3	147,3	2,15	950	18	135	60	78,25	340
Індукторний Г-306	14	28,6	400	13	5	65	10,42	10,42	13,44	420	49	70	60	66,8	700
Автомобільний синхронний	13,64	55	750	13	5	65	10,1	5,83	44	784	662	70	80	47	560

Коефіцієнт корисної дії генераторів вираховувався по формулі

$$\eta = \frac{P_d}{P_2 + p_{ма} + p_{ст.} + p_{мех}} \cdot 100\%$$

Як можна бачити із таблиці, 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.

Слід зазначити, що індукторний генератор з суміщеними обмотками для легкового автомобіля поки що не вдалось здійснити. Струм збудження і якірний струм у генераторів легкового автомобіля відрізняється на порядок (таблиця 1), по уже відомим схемам суміщення об'єднання обмоток не виявилось можливим здійснити. Але робота в цьому напрямку триває.

Індукторні генератори шестиполісного 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 по спеціальній схемі.

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.

Бібліографічний перелік

1. *Петренко А.Н. Методика расчета геометрии и параметров активной зоны одноименнополюсных индукторных автотракторных генераторов / Петренко А.Н. и др. // Вестник НТУ ХПИ. - №5. - 2005.*

2. *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» / В.А. Ваткин. – Москва, 2007. – 20с.*

3. *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» / А.О. Шлегель. – Самара, 2007. – 20с.*

4. Луцик В.Д. Патент №86352 Україна. Індукторний трифазний різнополюсний вентильний генератор. Опубл. 27.04.09. Бюл. №8.

5. Луцик В.Д. Трифазні вентильні індукторні генератори з суміщеною обмоткою. // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції – Севастополь: СевНТУ, 2010. - С. 25-27.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Заблодським М.М