

лектрика; σ – удельная проводимость несовершенного диэлектрика; $\varepsilon\varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Вторичные параметры кабеля определяются, исходя из первичных параметров, согласно [2]:

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}; \\ Z_{\dot{A}} &= \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Выводы

1. Предложена методика расчета с помощью САЕ – комплекса ANSYS/Emag и системы Matlab первичных и вторичных параметров кабелей связи по заданной геометрии и параметрам примененных материалов.

2. Данная методика позволяет проводить исследования электромагнитных процессов в кабелях с весьма сложными конструкциями, что дает ей преимущества перед существующими методиками.

3. Выполненные исследования (с помощью предложенной методики) позволили выявить новые тех-

нические эффекты. В частности, установлено, что высокочастотный ток в толще проводника может изменять направление на противоположное по отношению к основному току.

4. С использованием предложенной методики возможна разработка оптимальных конструкций сложных кабелей связи.

Перечень ссылок

1. Абрамов К. К. Моделирование и расчет кабелей связи на ЭВМ. – М.: Связь, 1979. – 80 с.
2. Гроднев И. И. Кабели связи. – М.: Энергия, 1976. – 272 с.
3. Кулешов В.Н. Теория кабелей связи. – М.: Связь-издат, 1950.– 420 с.
4. ANSYS Documentation //www.ansys.com/services/ss-documentation.asp
5. Дьяконов В. МАТЛАБ 6: учебный курс – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.

Поступила в редакцию 02.10.06 г.

После доработки 16.10.06 г.

У статті викладена методика моделювання електромагнітних процесів в кабелях зв'язку за допомогою системи ANSYS/Emag. Запропоновано розрахунок первинних параметрів кабелів по отриманих картинах поля та даний приклад програми на мові APDL.

The technique of electromagnetic processes modeling in the long-distance cables with the help of ANSYS/Emag system is considered. The calculation of cables initial parameters according to the obtained field figures is offered and APDL language program is given as the example.

УДК 321.313.12

В. Д. Лущик, В. В. Дяченко

Покращення параметрів індукторних генераторів за допомогою конденсаторів в обмотці збудження

Розглянутий індукторний вентильний генератор для автомобілів, у якого на зубцях статора розміщені котушки обмотки якоря і котушки обмотки збудження. Досліджується вплив ємнісних струмів в обмотці збудження на характеристики генераторів.

Актуальність проблеми

Автотракторні генератори випускаються щорічно мільйонними серіями. Тому покращення їх масогабаритних показників та підвищення надійності має важливе народногосподарське значення. Найбільш надійними є автотракторні генератори індукторного типу, так як в них відсутня обмотка на роторі, відсутні контактні кільця і щітки, а ротори надзвичайно прості при виготовленні. Однак за масогабаритними показниками та витратами активних матеріалів індукторні генератори значно поступаються синхронним генераторам з обмоткою збудження на роторі.

Мета роботи – покращення масогабаритних та питомих показників індукторних генераторів.

Викладення основного матеріалу

Розроблений, виготовлений і досліджений вентильний індукторний генератор радіального збудження,

відмінною особливістю якого є те, що на зубцях статора розміщують окремо зосереджені котушки якірної обмотки і обмотки збудження [1]. Число зубців статора $z_1=6$. Кожна пара зубців є окремою фазою. Також кожна пара зубців утворює магнітний потік збудження, $2\delta_{ca}=6$. Число зубців ротора $z_2=8$. Фази якірної обмотки з'єднані в трикутник, при цьому в фазах якірної обмотки послідовно та узгоджено з іншими фазами увімкнено діоди.

Завдяки діодам у фазах якірної обмотки протікає однопівперіодний випрямлений струм. Магнітний потік реакції якоря має таку ж форму, що і струм, який його створює. Він має постійну складову і в два рази меншу основну гармонічну складову. Тому в два рази в фазах якірної обмотки зменшуються індуктивні опори $x_{\dot{a}q}$ та $x_{\dot{a}d}$ і відповідно зменшуються ЕРС реакції якоря $A_{\dot{a}d}$ та поперечна ЕРС реакції якоря $A_{\dot{a}q}$. Жорсткість зовніш-

ньої характеристики генератора завдяки діодам різко зростає. При цьому магнітний потік реакції якоря, створений однопівперіодним випрямленим струмом, повинен бути направлений узгоджено з магнітним потоком, створеним обмоткою збудження.

Завдяки діодам потужність зростає майже в два рази порівняно з серійним індукторним генератором такої ж ваги і розмірів [2]. Можливості удосконалення цього індукторного генератора тільки завдяки діодам у фазах якірної обмотки не вичерпуються.

В усіх відомих серійної конструкції індукторних генераторах при необхідності застосовують конденсатори, які приєднують або паралельно до якірних виводів генератора, або, в залежності від обставин, вмикають послідовно з навантаженням, що підвищує $\cos \varphi$ навантаження або робить його навіть випереджуючим. Жорсткість зовнішньої характеристики завдяки конденсаторам зростає і тому зростає потужність генератора.

Однак в автомобільних генераторах приєднання конденсаторів до якірної обмотки є не ефективним. Лінійна напруга, що знімається з якірних виводів (з'єднання фаз трикутником), є занадто малою, всього:

$$U_{\phi} = U_{л} = \frac{U_d}{1,35} = \frac{14B}{1,35} = 10,37B.$$

Для помітного покращання характеристик генератора необхідні конденсатори надзвичайно великої ємності, а, значить, і габаритів, що для автомобільних генераторів є неприйнятним.

Особливістю цього генератора, на відміну від усіх відомих до теперішнього часу генераторів, є те, що в обмотці збудження, як і в якірній обмотці, наводиться ЕРС, і ця ЕРС такої ж частоти і пропорційна до числа витків обмотки збудження. Тобто, якщо ЕРС якірної обмотки A_{id} (випрямлена) при $n=5000$ об/хв. $A_{id}=62$ А, а лінійна ЕРС (вона ж і фазна при з'єднанні фаз трикутником) дорівнює:

$$E_{ол} = E_{оф} = \frac{E_{од}}{1,35} = \frac{62}{1,35} = 46 B,$$

то фазна ЕРС обмотки збудження (ЕРС, яка знімається з послідовно увімкнених котушок зубців 1 і 4, або 3 і 6, або 3 і 2) рівняється:

$$E_{офзб} = E_{оф} \frac{W_{зб}}{W_a} = 46 \frac{73}{29} = 115,8 B,$$

де $W_{зб}$ – число витків котушки обмотки збудження, W_a – число витків котушки обмотки якоря.

Відповідно струм в обмотці збудження при приєднанні до неї трьох конденсаторів (рис. 1) з ємністю кожний $\tilde{N}=1$ ієО (ємнісний опір одного конденсатора при частоті $f=666$ Ає складає $\tilde{\delta}_n=239$ іі) буде становити:

$$I_{сзб} = \frac{E_{офзб}}{x_c} = \frac{115,8}{239} = 0,4845 A.$$

Струм в якірній обмотці при приєднанні до її фаз таких же конденсаторів, буде складати всього:

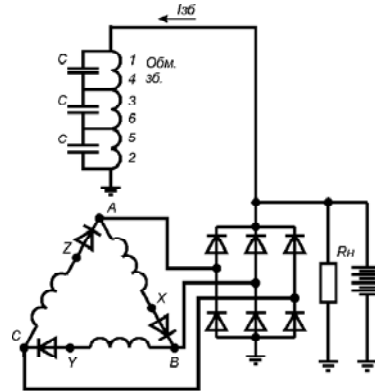


Рис.1. Електрична схема

$$I_{са} = \frac{U_{\phi}}{x_c} = \frac{10,37}{239} = 0,0434A,$$

тобто буде в 10 разів менший.

На рис. 2 показані характеристики холостого ходу без конденсаторів (крива 1) і з конденсаторами, приєднаними до обмотки збудження (крива 2). Вплив конденсаторів виявився надзвичайно ефективним. ЕРС $A_{іо}=62$ А з'являється не при п'яти амперах збудження, а всього при $I_{сзб}^2 = 3,4$ А, тобто ємнісний струм в обмотці збудження величиною $I_{н}^2 = 0,435$ А дає можливість зменшити струм збудження на 1,6 А. При $I_{сзб}^2 = 5$ А ємнісний струм в обмотці збудження дозволяє досягти ЕРС $A_{і}^2 = 75$ А (збільшення на 21 %). Потужність генератора при $n=5000$ об/хв. зростає на 20 %.

На рис. 3 показана векторна діаграма індукторного генератора при потужності генератора $D_2 = 400$ Ає. Йде опис до АЕН Аіо згідно з результатами випробувань при $I_{сзб}^2 = 5$ А становить:

$$E_{оф} = \frac{E_{од}}{1,35} = \frac{62}{1,35} = 46B.$$

Фазний струм якоря: $I_a^2 = 13,443$ А,

$$I_{ад} = I_a \sin \psi = 12,8A,$$

$$I_{ақ} = I_a \cos \psi = 4,2A,$$

$$E_{ад} = I_{ад} x_{ад} = 12,8 \cdot 2,26 = 28,5B,$$

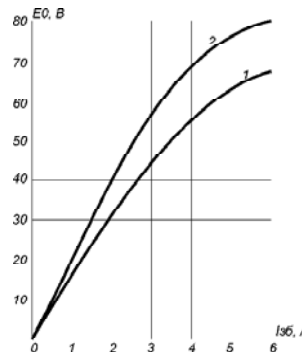


Рис. 2. Характеристика холостого ходу

$$E_{aq} = I_{aq} x_{aq} = 4,2 \cdot 1,66 = 7В,$$

$$E_{\sigma} = I_a x_{\sigma} = 13,443 \cdot 1,056 = 14,2В,$$

$$E_a = I_a R_a = 13,443 \cdot 0,166 = 2,23В,$$

$$U_{\phi} = 10,37В.$$

Так як ємнісний струм виникає завдяки ЕРС $\dot{A}_{i\dot{c}a}$, яка по фазі співпадає з $\dot{A}_{i\dot{o}}$ і перевищує останню в

$$\frac{W_{зб}}{W_a} = \frac{73}{29} = 2,52 \text{ рази (на рис. 3 } \dot{A}_{i\dot{c}a} \text{ показана в змен-$$

шеному масштабі), то ємнісний струм $\dot{I}_{c\dot{o}}$ випереджує $\dot{A}_{i\dot{c}a}$ на 90° і співпадає по фазі зі струмом збудження $\dot{I}_{c\dot{a}}$. На рис. 3 ці струми показані в реальному співвідношенні.

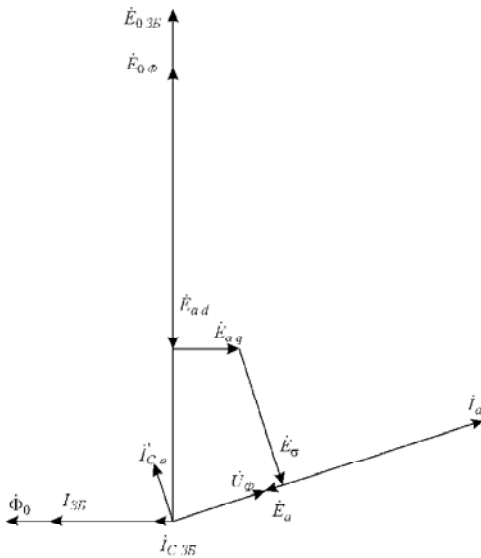


Рис. 3. Векторна діаграма

В даному індукторному генераторі виникає нове фізичне явище, яке раніше ніколи не розглядалось: співпадання по фазі постійного струму збудження $\dot{I}_{c\dot{a}}$ і змінного ємнісного струму $\dot{I}_{c\dot{o}}$. Цікаво порівняти індукції в повітряному зазорі магнітних потоків, створюваних струмом збудження $\dot{I}_{c\dot{a}}$ і ємнісним струмом $\dot{I}_{c\dot{o}}$.

При співпаданні зубців статора і ротора індукція $B_{\delta \max}$ в повітряному зазорі між зубцями від постійного струму збудження дорівнює:

$$B_{\delta \max} = \frac{I_{зб} \cdot W_{зб\phi}}{1,6 \cdot k_{\delta} \cdot k_M \cdot \delta \cdot 10^3} = \frac{5 \cdot 2 \cdot 73}{1,6 \cdot 1,1 \cdot 1,05 \cdot 0,35 \cdot 10^3} = 1,1286 \text{ Тл}, \quad (1)$$

де k_{δ} – коефіцієнт повітряного зазору, приймаємо $k_{\delta} = 1,1$; k_1 – коефіцієнт, що враховує опір сталевих дільниць магнітопроводу, визначаємо із аналізу кривої холостого ходу, $k_1 = 1,05$; δ – повітряний зазор, $\delta = 0,35 \text{ мм}$.

Щоб визначити середнє значення індукції $B_{\delta \min}$ під зубцем статора, коли він знаходиться напроти пазу

ротора (рис.4), скористаємось експериментальними даними. Нам відома ЕРС фази ярної обмотки при струмі збудження $\dot{I}_{c\dot{a}} = 5 \text{ А}$. Вона дорівнює $\dot{A}_{i\dot{o}} = 46 \text{ А}$. Відомо також, що:

$$E_{оф} = 2,22 \cdot (1 - k) \cdot f \cdot W_{аф} \cdot B_{\delta \max} \cdot b_z \cdot \ell_{\delta} \cdot 10^{-4}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт, що показує, яку частину в долях одиниці складає $B_{\delta \min}$ від $B_{\delta \max}$, $k = \frac{B_{\delta \min}}{B_{\delta \max}}$; $W_{аф}$ – число витків фази ярної обмотки $W_{аф} = 2W_a = 2 \cdot 29 = 58$; b_z – ширина зубця статора, $b_z = 1,54 \text{ м}$; ℓ_{δ} – довжина пакета статора, $\ell_{\delta} = 4,8 \text{ м}$.

Використовуючи (2), знаходимо:

$$1 - k = \frac{E_{оф}}{2,22 \cdot f \cdot W_{аф} \cdot B_{\delta \max} \cdot b_z \cdot \ell_{\delta}} = \frac{46}{2,22 \cdot 666 \cdot 58 \cdot 1,1286 \cdot 1,54 \cdot 4,8 \cdot 10^{-4}} = 0,642. \quad (3)$$

Звідки $k = 1 - 0,642 = 0,358$;

$$B_{\delta \min} = 0,358 \cdot B_{\delta \max} = 0,358 \cdot 1,1286 = 0,4040 \text{ Тл}.$$

Зазначимо, що реальна зміна величин індукції B_{δ} в повітряному зазорі між зубцем статора і ротором при його обертанні показана на рис. 4а жирною лінією.

Максимальне значення індукції від ємнісного струму $\dot{I}_{c\dot{o}}$, коли зубець статора знаходиться проти зубця ротора, визначається за формулою (1). Підставивши замість струму $\dot{I}_{c\dot{a}}$ максимальне значення

$$I_{c\dot{o} \max} = \sqrt{2} \cdot I_{c\dot{o}} = \sqrt{2} \cdot 0,4845 = 0,6852 \text{ А},$$

одержимо:

$$B_{\delta \max c} = 0,1547 \text{ Тл},$$

а сумарне значення максимальної індукції від двох

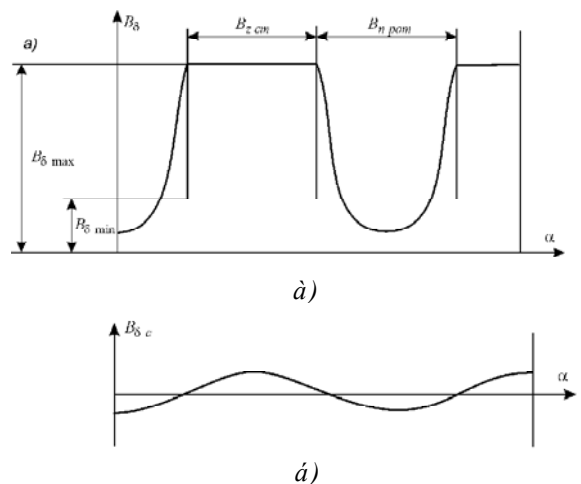


Рис. 4. Індукція під зубцем статора залежності від кута повороту ротора

магнітних потоків дорівнює:

$$\sum B_{\delta \max} = B_{\delta \max} + B_{\delta \max c} = 1,1286 + 0,1547 = 1,2833 \text{ Тл} \quad (4)$$

З урахуванням опору магнітного кола справжнє сумарне значення максимальної індукції буде в k_M разів менше:

$$\sum B'_{\delta \max} = \frac{\sum B_{\delta \max}}{k_M} = \frac{1,2833}{1,05} = 1,2222 \text{ Тл}. \quad (5)$$

Коли в результаті обертання ротора зубець статора займає положення проти пазу ротора, напрям емісного струму змінюється на протилежний, індукцію $B_{\delta \min c}$, створювану емісним струмом, можна визначити, використовуючи той же коефіцієнт k із формули (3), що і для постійного струму збудження:

$$B_{\delta \min c} = k \cdot B_{\delta \max c} = 0,358 \cdot 0,1547 = 0,0554 \text{ Тл}. \quad (6)$$

На рис. 4 б показана індукція $B_{\delta \delta \text{бс}}$, створена емісним струмом. Сумарне мінімальне значення індукції тепер визначається як різниця двох індукцій:

$$\sum B_{\delta \min} = B_{\delta \min} - B_{\delta \min c} = 0,4040 - 0,0554 = 0,3486 \text{ Тл}. \quad (7)$$

Коефіцієнт k (позначимо тепер його як k') буде становити:

$$k' = \frac{\sum B_{\delta \min}}{\sum B_{\delta \max}} = \frac{0,3486}{1,2222} = 0,2852. \quad (8)$$

ЕРС $E'_{\text{оф}}$, що буде наводитись у фазі якірної обмотки, знаходимо, використовуючи формулу (2). В цю формулу замість k підставляємо $k' = 0,2852$, замість

$B_{\delta \max}$ підставляємо $\sum B'_{\delta \max} = 1,2222$, і одержуємо

$$E_{\text{оф}} = 2,22 \cdot (1 - k') \cdot f \cdot W_{\text{аф}} \cdot \sum B'_{\delta \max} \cdot b_z \cdot \ell_{\delta} \cdot 10^{-4} = 2,22 \cdot (1 - 0,2852) \cdot 666 \cdot 58 \cdot 1,2222 \cdot 1,54 \cdot 4,8 \cdot 10^{-4} = 55,38 \text{ А}, \quad (9)$$

що на 0,5 % відрізняється від експериментальних даних.

Для створення такого ж за величиною емісного струму $I'_{\text{на}}$ в якірній обмотці необхідна ємність конденсаторів у 10 разів більша:

$$C = \frac{I_{\text{ca}} \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_{\phi}} = \frac{0,435 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 666 \cdot 10,37} = 10,03 \text{ мкФ}. \quad (10)$$

Так як магнітний потік створює МРС $F_c = I_{\text{на}} \cdot W_{\text{ад}}$, то струм I'_{ca} в якірній обмотці, еквівалентний струму $I'_{\text{на}}$ в обмотці збудження, визначається так:

$$I'_{\text{ca}} = I_{\text{ca}} \frac{W_{\text{а}}}{W_{\text{зб}}} = 0,435 \frac{29}{73} = 0,173 \text{ А}. \quad (11)$$

Відкладемо його в десятикратному збільшенні на векторній діаграмі на рис. 3. Цей струм випереджує напругу U_{δ} на 90° . Складова цього струму, перпендикулярна до ЕРС $E'_{\text{ю}}$, становить:

$$I'_{\text{cad}} = I'_{\text{ca}} \cos \Psi = I'_{\text{ca}} \frac{I_{\text{aq}}}{I_{\text{a}}} = 0,173 \cdot \frac{4,2}{13,443} = 0,054 \text{ А}, \quad (12)$$

що складає всього 11 % від емісного струму $I'_{\text{на}}$.

Цей емісний струм в якірній обмотці, створений конденсаторами з ємністю $\tilde{N} = 10 \text{ іФ}$, на покращення параметрів генератора практично не впливає.

Висновок

Застосування конденсаторів, що вмикаються в обмотку збудження, відкривають нові багатообіцяючі перспективи у подальшому вдосконаленню розробляємих індукторних генераторів які розробляються із суміщеними обмотками.

Перелік посилань

1. Лущик В. Д. Індукторний трифазний різнополюсний вентильний генератор. МПК 7 НО2К 19/20. Заявка на винахід № а 200501835, дата подання 28.02.2005.
2. Лущик В. Д. Покращення параметрів вентильних індукторних генераторів. // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць – Харків. – 2005. №48. – С. 77–82.

Поступила в редакцію 15.06.06 г.

Після доработки 30.08.06 г.

Рассмотрен индукторный вентильный генератор для автомобилей, у которого на зубцах статора размещены катушки обмотки якоря и катушки обмотки возбуждения. Исследуется влияние емкостных токов в обмотке возбуждения на характеристики генератора.

The inductor valve generator for automobiles is considered; the armature coils and magnetizing coils are located on stator barbs of this generator. The influence of capacitance current in the excitation winding on the generator performances is investigated.