

РОЗРАХУНОК РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНОГО ЗВАРЮВАЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ВЕНТИЛЬНИМ ЗБУДЖЕННЯМ ЗА СХЕМОЮ ЗАМІЩЕННЯ

Л.І. Мазуренко¹, докт. техн. наук, В.І. Романенко², аспірант, О.В. Джура³, канд. техн. наук
1, 2, 3 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розглянуто T-подібну схему заміщення зварювального асинхронного генератора з вентильним збудженням. Отримано вираз, що описує залежність між опором навантаження в колі постійного струму і ковзанням генератора. Запропоновано підхід до визначення мінімального активного опору в колі постійного струму, наведено рекомендації щодо вибору робочого діапазону ковзання та алгоритм розрахунку робочих характеристик зварювального генератора. Бібл. 8, рис. 6.

Ключові слова: асинхронний генератор, вентильне збудження, зварювання, зовнішня характеристика.

Вступ. Асинхронні генератори з вентильним збудженням (АГ з ВЗ) доцільно використовувати в автономних електростанціях з приводом від дизеля або від карбюраторного двигуна, а також у гідро- і вітроенергетичних установках. Однак можливе також використання АГ з ВЗ для живлення зварювальної дуги [4]. Для АГ з ВЗ, що працюють у складі зварювальних комплексів, актуальною задачею є розробка методики розрахунку, яка б давала змогу отримувати інформацію про робочий діапазон зміни ковзання, максимальне навантаження, діючі значення струмів і напруг та основні енергетичні співвідношення генератора. В основу методики може бути покладено динамічну або статичну модель АГ з ВЗ. У першому випадку необхідно виконувати складні процедури диференціювання, що потребують значних обчислювальних ресурсів. Тому через простоту обчислень і прийнятну точність результатів у методиці доцільно використовувати саме статичну модель генератора.

Метою даної статті є розробка методики розрахунку робочих характеристик зварювального АГ з ВЗ на основі схеми заміщення з урахуванням специфіки його навантаження при зварюванні.

Принцип роботи зварювального АГ з ВЗ. Зварювальний АГ з ВЗ (рис. 1) – це трифазна асинхронна машина, до статорної обмотки якої підключено вентильний перетворювач (ВП), виконаний за схемою автономного інвертора напруги. До виходу постійного струму ВП підключено резистор зі змінним опором r_0 , який забезпечує роботу АГ в ділянці самозбудження при електрозварюванні. На рис. 1 опір дуги позначено як R_d . Керування частотою перетворювача здійснюють таким чином, що генератор забезпечується необхідною реактивною потужністю і водночас на виході постійного струму ВП підтримується напруга відповідно до заданої зовнішньої характеристики при зварюванні. Регульований резистор має максимальний опір $r_0 = R_0$ при короткому замиканні.

Опір резистора зменшується зі зростанням опору зварювальної дуги. При цьому має виконуватися умова $r_0 + R_d \geq R_{n\min}$, де $R_{n\min}$ – мінімальна величина опору в колі постійного струму, при якому генератор не втрачає самозбудження. Опір r_0 регульованого резистора зменшується до нуля при $R_d \geq R_{n\min}$.

Аналіз схеми заміщення. Для аналізу процесів асинхронного генератора при роботі в режимі стабілізації напруги використовується Г-

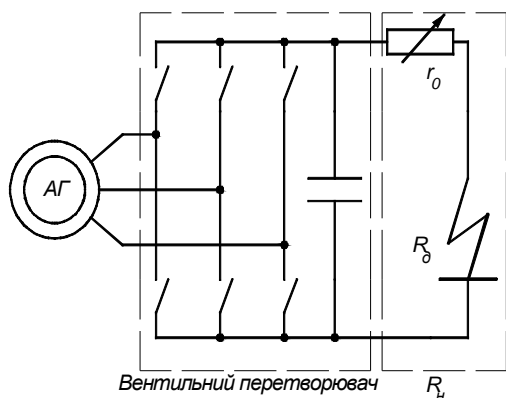


Рис. 1

подібна схема заміщення [6]. Це не припустимо при дослідженні робочих характеристик АГ з ВЗ, що працює на зварювальну дугу. В цьому випадку доцільно використовувати Т-подібну схему заміщення [3, 7, 8]. Така схема заміщення, де вентильна система збудження представлена змінним ємнісним опором X_{Π} , а навантаження в колі постійного струму – резистором з активним опором $R_n = r_0 + R_o$, показана на рис. 2. Вважається, що вал генератора обертається із сталою швидкістю ω_p . Ковзання $s = (\omega_n - \omega_p)/\omega_n$ в електричній машині регулюється при зміні частоти імпульсів керування перетворювача системи збудження. Індуктивні опори розсіювання статора і ротора $X_{1,2} = \omega_p L_{1,2}/(1 - s)$.

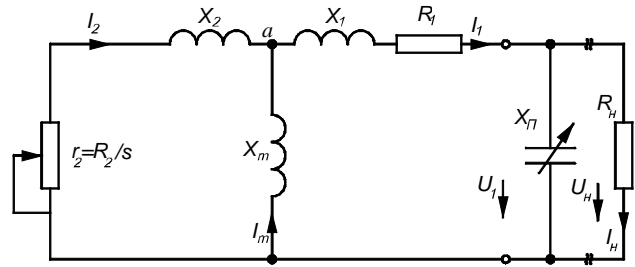


Рис. 2

Повні опори статора і ротора визначаються як $\dot{Z}_1 = R_1 + jX_1$; $\dot{Z}_2 = r_2 + jX_2$. Тут і далі позначення більшості величин у рівняннях загальновідомі. При необхідності їм дається пояснення.

Відповідно до другого закону Кірхгофа для статорного і роторного кола справедливі рівняння

$$\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \dot{Z}_1 + jX_m \dot{I}_m = 0; \quad (1)$$

$$\dot{I}_2 \dot{Z}_2 - jX_m \dot{I}_m = 0. \quad (2)$$

Враховуючи, що ЕРС контура намагнічування $\dot{E}_1 = -jX_m \dot{I}_m$, отримаємо рівняння (1) і (2) у такій формі:

$$\dot{U}_1 = -\dot{I}_1 \dot{Z}_1 + \dot{E}_1; \quad (3)$$

$$\dot{I}_2 \dot{Z}_2 = -\dot{E}_1. \quad (4)$$

Для струмів у вузлі a справедливе рівняння

$$\dot{I}_m + \dot{I}_2 - \dot{I}_1 = 0. \quad (5)$$

Струми ротора \dot{I}_2 і контура намагнічування \dot{I}_m визначаються з виразів

$$\dot{I}_2 = -\dot{E}_1 / \dot{Z}_2; \quad (6)$$

$$\dot{I}_m = -\dot{E}_1 / jX_m, \quad (7)$$

а струм \dot{I}_1 – з рівняння (5) [враховуються (6) і (7)]:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \dot{I}_2 = -\dot{E}_1 (1/jX_m + 1/\dot{Z}_2) = -\dot{E}_1 \dot{Y}_{ек}, \quad (8)$$

де $\dot{Y}_{ек} = G_{ек} - jB_{ек}$ – повна провідність.

При цьому активна $G_{ек}$ і реактивна $B_{ек}$ складові провідності $\dot{Y}_{ек}$ визначаються з виразів

$$G_{ек} = r_2 / (r_2^2 + X_2^2);$$

$$B_{ек} = (r_2^2 + X_2^2 + X_2 X_m) / (X_m (r_2^2 + X_2^2)).$$

З урахуванням рівняння (8), а також значення Z_1 рівняння (3) набуде вигляду

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 \dot{Y}_{ек} \dot{Z}_1 + \dot{E}_1 = \dot{E}_1 (1 + \dot{\Delta}), \quad (9)$$

де $\dot{\Delta} = \Delta_a + j\Delta_p$, $\Delta_a = R_1 G_{ек} + X_1 B_{ек}$, $\Delta_p = X_1 G_{ек} - R_1 B_{ек}$.

Оскільки у квазісталому режимі АГ з ВЗ діюче значення фазної і випрямленої напруг співвідносяться як $K_{U0} = U_n / U_1 = \pi / \sqrt{2}$ [3], то струм навантаження визначається з виразу

$$I_n = U_n / R_n = K_{U0} U_1 / R_n,$$

який з урахуванням (9) набуде вигляду:

$$I_n = K_{U0} E_1 (1 + \Delta) / R_n . \quad (10)$$

Баланс активних потужностей для схеми, зображеної на рис. 2, при умові, що навантаження кола постійного струму рівномірно розподіляється між обмотками статора, має вигляд

$$I_1^2 R_1 + I_2^2 r_2 + I_n^2 R_n / 3 = 0 . \quad (11)$$

Після підстановки в останнє рівняння значень струмів із (6), (8) і (10) отримаємо

$$E_1^2 Y_{ек}^2 R_1 + E_1^2 r_2 / Z_2^2 + K_{U0}^2 E_1^2 (1 + \Delta)^2 / 3 R_n = 0 . \quad (12)$$

Рівняння (12) дозволяє визначити опір навантаження для даного значення ковзання:

$$R_n = \frac{-K_{U0}^2 (1 + \Delta)^2}{3(Y_{ек}^2 R_1 + r_2 / Z_2^2)} . \quad (13)$$

Для розрахунку напруг і струмів АГ з ВЗ необхідно мати інформацію про величину ємнісного опору X_{II} схеми заміщення. Це дає змогу за характеристикою холостого ходу генератора визначити електрорушійну силу (ЕРС) контура намагнічування, а за схемою заміщення – струми і напруги, як це робиться для генераторів з ємнісним збудженням [1]. Однак не існує однозначної інформації про залежність $X_{II} = f(s)$ для генераторів з вентильним збудженням. Тому доцільно скористатися підходом, запропонованим у роботі [2], де вважається, що частота перетворювача змінюється таким чином, що при кожному допустимому навантаженні генератор забезпечується вентильною системою збудження реактивною потужністю, необхідною для підтримання напруги на його зажимах відповідно до заданої зовнішньої характеристики. Це дозволяє за величиною опору навантаження в колі постійного струму для заданого значення ковзання визначити напругу і струм зварювання як координати

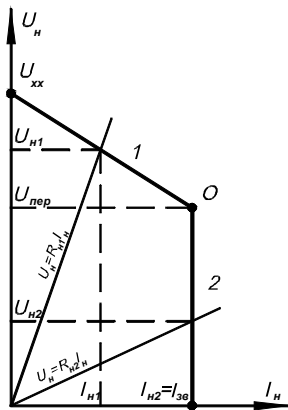


Рис. 3

точки перетину вольт-амперної характеристики навантаження $U = IR_n$ і заданої зовнішньої характеристики, як показано на рис. 3, де U_{n1} , U_{n2} , I_{n1} і I_{n2} – відповідно значення напруг і струмів кола постійного струму генератора для опорів навантаження R_{n1} і R_{n2} .

Зовнішня зварювальна характеристика генератора (ламана лінія $U_{xx} O I_{36}$) характеризується такими параметрами (рис. 3): U_{xx} – напруга холостого ходу; I_{36} – струм зварювання; $U_{nep} = 20 + 0,08 I_{36}$ – напруга перемикавання з жорсткої (1) на крутоспадну (2) ділянку характеристики.

Опір навантаження у точці O визначається як $R_{nep} = U_{nep} / I_{36}$. Тому для ділянок 1 і 2 зовнішньої характеристики (рис. 3) відповідно правомірні нерівності $R_n \geq R_{nep}$; $R_n < R_{nep}$.

Напруга і струм на ділянці 1 зовнішньої характеристики розраховуються за допомогою виразів

$$U_n = U_{xx} I_{36} R_n / (R_n I_{36} - U_{nep} + U_{xx}) \text{ та } I_n = U_n / R_n , \quad (14)$$

а на ділянці 2 – із виразів

$$I_n = I_{36} \text{ і } U_n = I_n R_n . \quad (15)$$

Перший із виразів (14) отримано при сумісному розв'язку рівнянь, що описують жорстку ділянку зовнішньої характеристики (рис. 3) і вольт-амперну характеристику навантаження, що перетинає цю ділянку.

Навантаженням у колі постійного струму АГ з ВЗ споживається потужність $P_n = I_n^2 R_n$.

Оскільки не враховуються втрати у ВП, то ця потужність дорівнює потужності на виході генератора $P_{II} = 3U_1 I_{1a}$, де I_{1a} – активна складова струму I_1 .

Сума втрат в генераторі

$$\sum P_c = 3(I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2) + P_{mex}, \quad (16)$$

де P_{mex} – механічні втрати.

При аналізі схеми заміщення не враховано втрати в сталі генератора, втрати у ВП і від вищих гармонік.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) зварювального генератора

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \sum P_c}. \quad (17)$$

Слід зазначити, що даний підхід до аналізу АГ з ВЗ при електрозварюванні справедливий і для випадків, якщо зовнішня характеристика буде відрізнитися від зображеної на рис. 3.

Визначення робочого діапазону ковзання, мінімального опору в колі постійного струму та опору зварювальної дуги. Графік зміни опору R_n в колі постійного струму ВП в залежності від ковзання s , який побудовано відповідно (13), для АГ потужністю 1,5 кВт, номінальна швидкість якого 1500 об/хв., що має параметри $R_1 = 0,014$ Ом, $R'_2 = 0,0055$ Ом, $L_1 = 42$ мкГн, $L'_2 = 49$ мкГн, показано на рис. 4. Залежність індуктивності контура взаємодукції від ЕРС, що отримана з досліду холостого ходу, показана на рис. 5. Залежність $R_n = f(s)$ має мінімум у точці, що визначає ковзання $s_{R_{nmin}}$, при якому опір навантаження буде найменшим (R_{nmin}). Якщо опір кола постійного струму буде менший, ніж R_{nmin} , то генератор втратить збудження. Тому максимальне значення опору додаткового регульованого резистора (рис. 1) має вибиратися із умови $R_0 > R_{nmin}$.

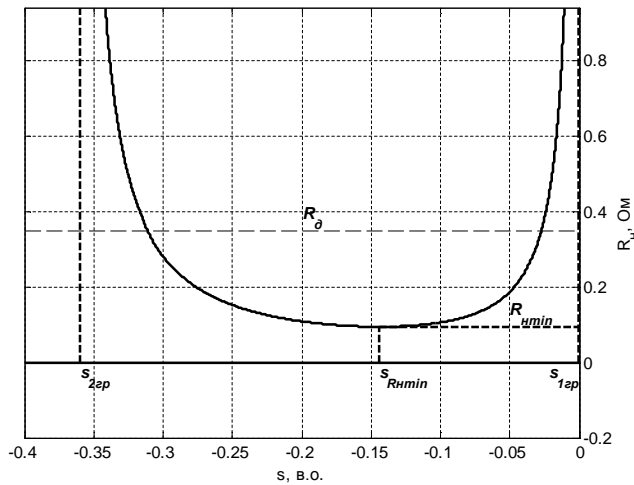


Рис. 4

При $R_n > R_{nmin}$ генератор може працювати при двох значеннях ковзання, тобто ділянка стійкої роботи АГ обмежена двома граничними ковзаннями s_{1cp} і s_{2cp} . При налаштуванні системи керування необхідно орієнтуватися на ковзання, які належать діапазону $s_{R_{nmin}} \dots s_{1cp}$, оскільки у цьому випадку втрати в роторі АГ будуть меншими, ніж у випадку вибору діапазону ковзань $s_{R_{nmin}} \dots s_{2cp}$. Необхідно підкреслити, що розраховані за рівнянням (13) значення R_n будуть додатні для ділянки стійкого самозбудження. Для значень ковзань, що не входять до діапазону $s_{2cp} \dots s_{1cp}$,

значення R_n – від'ємні.

Зв'язок між напругою і струмом зварювання визначається залежністю

$$U_{\delta} = 20 + 0,04I_{\delta}.$$

Опір дуги визначається як

$$R_{\delta} = (20 + 0,04I_{\delta})/I_{\delta}. \quad (18)$$

При умові, що струм зварювання змінюється від $I_{\delta min}$ до $I_{\delta max}$, можливий опір (Ом) дуги належить діапазону

$$R_{\delta} = 20/I_{\delta max} + 0,04 \dots 20/I_{\delta min} + 0,04. \quad (19)$$

Так, наприклад, опір дуги АГ потужністю 1,5 кВт при струмі зварювання 65 А становить 0,348 Ом. У цьому випадку забезпечується надійна робота генератора в ділянці самозбудження при відсутності додаткового резистора з опором r_0 .

Таким чином, при аналізі графіка залежності (13) можна отримати інформацію про мінімальний опір у колі постійного струму, робочий діапазон ковзання АГ, а також визначити можливий діапазон зміни струму зварювання без включення додаткового резистора для забезпечення збудження генератора.

Алгоритм розрахунку статичних робочих характеристик генератора. Отримані

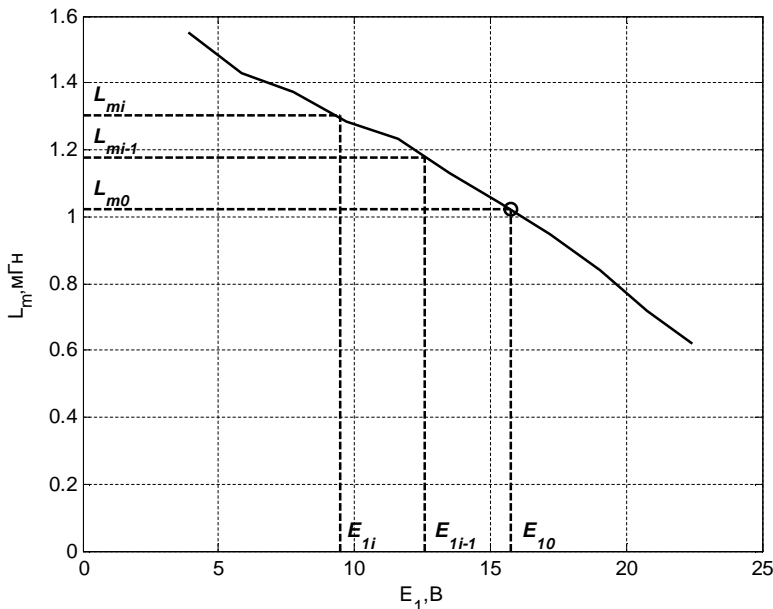


Рис. 5

аналітичні залежності дозволяють виконати розрахунок робочих характеристик зварювального АГ з відомою зовнішньою характеристикою з урахуванням насичення контура намагнічування. Розрахунок проводиться в такій послідовності.

1. На підготовчому кроці розрахунку ($i=0$) із графіка залежності $L_m = f(E_1)$ визначається індуктивність контура намагнічування L_{m0} для $E_{10} = U_{xx}/K_{U0}$, що відповідає точці $s_0 \approx 0$ для заданої зовнішньої характеристики.

2. На кроці $i=1,2,\dots,n$ визначається нове значення ковзання $s_i = s_{i-1} + \Delta s$ (Δs – приріст ковзання). Для величини $L_{m_{i-1}}$ із попереднього кроку і нового значення ковзання s_i розраховується еквівалентний опір кола постійного струму $R_{ni} = f(L_{m_{i-1}}, s_i)$ за рівнянням (13). За виразами (14) або (15) визначаються на-

пруга і струм навантаження U_{ni} і I_{ni} . Розраховуються фазна напруга статора $U_{li} = U_{ni}/K_{U0}$, ЕРС E_{li} за виразом (9), струми I_{2i} , I_{mi} і I_{1i} відповідно за виразами (6), (7) і (8) і ККД η_i за (17). Визначається індуктивність контура намагнічування L_{mi} , що відповідає отриманому значенню ЕРС E_{li} для ковзання s_i .

3. Перехід до нового кроку (початок п. 2). Величина приросту ковзання Δs вибирається такою, щоб значення ЕРС E_{li} при ковзанні s_i відрізнялось від зна-

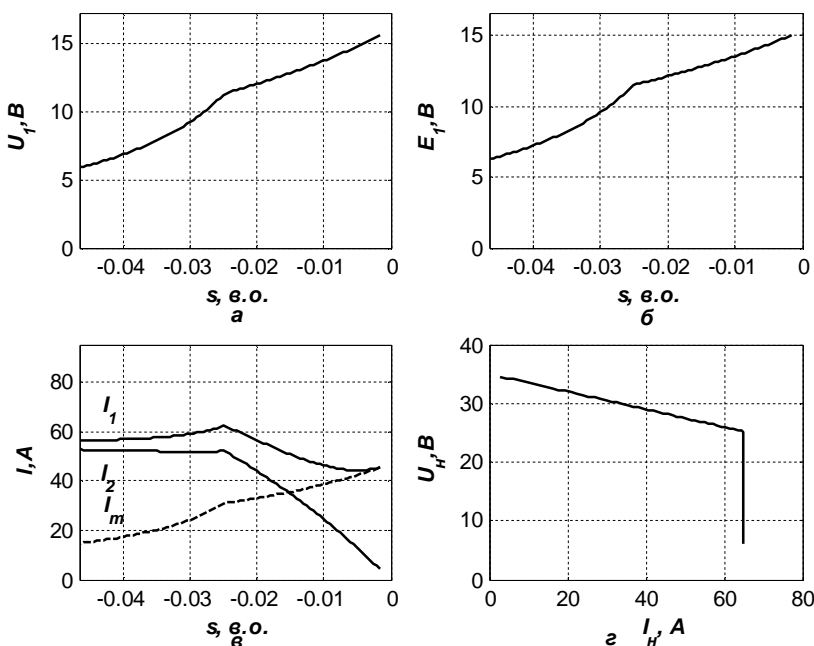


Рис. 6

чення ЕРС $E_{1_{i-1}}$ на попередньому кроці при ковзанні s_{i-1} не більше ніж на 1 % (рис. 5), тобто $(E_{1_i} - E_{1_{i-1}}) / E_{1_i} \leq 0,01$.

На рис. 6 а, б, в показано характер зміни діючих значень напруги, ЕРС і струмів для генератора потужністю 1,6 кВт, а на 6 г – зовнішню характеристику, при якій проводився розрахунок.

Відхилення між результатами дослідження робочих характеристик АГ з ВЗ, отриманими при аналізі схеми заміщення і при розрахунку на математичній моделі на основі повної системи диференціальних рівнянь, становить не більше 15 %. Адекватність математичної моделі перевірена при порівнянні значень струмів і напруг АГ, одержаних за її допомогою, з експериментальними даними [5].

Висновки. Розроблено методику розрахунку робочих характеристик зварювального АГ з ВЗ, яка базується на його схемі заміщення. Методика враховує особливості роботи генератора в режимі електрозварювання. При розрахунку використовуються дійсні зовнішні характеристики, а також залежність, яка відображає зв'язок між навантаженням і ковзанням генератора, що дає змогу визначити як робочий діапазон ковзання, так і мінімальний опір у колі постійного струму для забезпечення роботи АГ в ділянці самозбудження. У подальшому для підвищення точності розрахунку робочих характеристик у методиці необхідно врахувати втрати в сталі генератора, втрати у вентильному перетворювачі і від вищих гармонік.

1. *Іванов А.О., Пулатов В.Б., Тищенко О.О.* Електростанції з асинхронним генератором. – К.: Техніка, 1967. – 157 с.
2. *Костырев М.Л., Скороспешкин А.И.* Автономные асинхронные генераторы с вентильным возбуждением. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 160 с.
3. *Лесник В.А., Мазуренко Л.И.* Многопостовые источники питания сварочной дуги на основе асинхронных генераторов // Техн. електродинаміка. – Темат. вип. «Проблеми сучасної електромеханіки». – 2000. – Ч. 2. – С. 76–82.
4. *Мазуренко Л.И., Романенко В.И.* Асинхронний вентильний генератор в якості керованого джерела струму // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 28. – С. 66–67.
5. *Мазуренко Л.И., Романенко В.И.* Математична модель асинхронного генератора з вентильним збудженням з використанням методу припасовування // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 4. – С. 19–24.
6. *Торопцев Н.Д.* Асинхронные генераторы автономных систем. – М.: Знак, 1997. – 288 с.
7. *Ghandan Ghakaborty, Sailendra N. Bhardra, Ajit K. Chattopadhyay* Excitation requirements for stand alone three-phase induction generator // IEEJ transaction on energy conversion. – Vol. 13. №4, December 1998. – P. 358–365.
8. *Luiz A.C. Lopes, Rogério G. Almeida* Wind driven self-excited induction generator with voltage and frequency regulated by a reduced rating voltage source inverter // IEEJ transaction on energy conversion. – Vol. 21, №2, June 2006. – P. 297–304.

УДК 621.313.332

Л.И. Мазуренко¹, докт. техн. наук, **В.И. Романенко**², аспірант, **А.В. Джура**³, канд. техн. наук

1,2,3 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Расчет рабочих характеристик автономного сварочного асинхронного генератора с вентильным возбуждением по схеме замещения

Рассмотрена T-образная схема замещения сварочного асинхронного генератора с вентильным возбуждением. Получено выражение, которое описывает зависимость между нагрузкой цепи постоянного тока и скольжением в генераторе. Предложен подход к определению минимального активного сопротивления в цепи постоянного тока, даны рекомендации относительно выбора рабочего диапазона скольжения и алгоритм расчета рабочих характеристик сварочного генератора.
Библ. 8, рис. 6.

Ключевые слова: асинхронный генератор, вентильное возбуждение, сварка, внешняя характеристика.

L.I. Mazurenko¹, **V.I. Romanenko**², **O.V. Dzhura**³

1,2,3 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Substitution-based calculation of performance capabilities of independent welding induction generator with gating excitation

In this paper a T-form equivalent circuit of a stand-alone welding induction generator with an inverter excitation was discussed. The relation between load resistance in DC circuit and slip in generation has been obtained. The approach to determination a minimum

resistance in DC circuit was proposed. The recommendation for the selection of a working slip area and welding generator performance calculation algorithm are given. References 8, figures 6.

Key words: induction generator, inverter excitation, welding, output characteristic.

Надійшла 1.11.2010
Received 1.11.2010