

системою з використанням АВН. З економічних міркувань, для ВЕУ малої потужності доцільніше буде використовувати замість АВН DC/DC перетворювач з конденсаторними батареями.

З отриманих результатів зрозумілі нові завдання подальших досліджень: підвищення загального ККД ВЕУ на малих швидкостях вітру; розроблення стратегії оптимального керування АВН з врахуванням додаткових втрат в сталі та нерівності індуктивностей по осях d і q в СМ з ПМ ($L_d \neq L_q$).

1. Щур І.З. Багатофункціональне керування активним випрямлячем в локальній вітроенергетичній системі з вертикальною віссю обертання / І.З. Щур, О.Р. Турленко // *Вестн. Нац. ун-та "Харьк. политехн. ин-т": Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.* – Харьков, 2008. – Вып. 30. – С. 418–420. 2. Tan K. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors / Kelvin Tan, Syed Islam // *IEEE Trans. on energy conversion.* – 2004. – Vol. 19, No. 2. – P. 392–399. 3. Neris A.S. A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak ac system / A.S. Neris, N.A. Vovos, G.B. Giannakopoulos // *IEEE Trans. on energy conversion.* – 1999. – Vol. 14, No. 1. – P. 122–127. 4. Muteanu I. Optimal control of wind energy systems / Muteanu I., Bratcu A. I., Cutululis N.A., Ceangă E. – London: Springer, 2008. – 284 p. 5. Helle L. Wind turbine systems / L. Helle, F. Blaabjerg // *Control in Power Electronics.* – Academic Press, 2002. – P. 483–510. 6. Bianchi F.D. Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design / Bianchi F.D., Battista H.D., Mantz R.J. – London: Springer, 2007. – 206 p. 7. Monajemy R. Comparison of torque control strategies based on the constant power loss control system for PMSM / R. Monajemy, R. Krishnan // *Control in Power Electronics.* – Academic Press, 2002. – P. 225–250.

УДК 666. 96:621.36

П.Є. Яковчук, Р.А. Солтисік, І.Я. Почапська
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра ОП

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОНАГРІВАННЯ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА СКЛА

© Яковчук П.Є., Солтисік Р.А., Почапська І.Я., 2009

Показано залежність параметрів технологічного регулювання апаратури під час виробництва скла та від його хімічного складу.

The dependence of parameters of the technological adjusting of apparatus is rotined at making of glass and from his chemical composition.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими завданнями. На більшості сучасних виробництв варять скло у великих регенеративних або рекуперативних печах, виконаних з вогнетривких матеріалів. Сучасна технологія виробництва скла передбачає використання печей періодичної та неперервної дії, для обігрівання яких, переважно, використовується нафта, природний газ та енергія електричного струму. Проте, з зростанням цін на енергоносії питання вибору конструкції печі та способу її обігрівання набувають вирішального значення. Важливим є те, що в газових печах горшкового типу тепловий коефіцієнт корисної дії становить 6–7 %, газова піч неперервної дії ванного типу має коефіцієнт корисної дії в межах 10–15 %, а цей показник для печі з електричним обігріванням досягає 40–70 %.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У промисловості застосовують три основні типи печей: газополум'яні, газополум'яні з електричним підігріванням та електричні. Під час вироб-

ництва скла в газових печах питома витрата енергії на одиницю товарної продукції становить, в середньому, 20,4 МДж /кг [1], а у разі застосування електрообігрівання зменшується до 3–3,5 МДж /кг [2]. Крім того, в електричних печах виробництво скломаси на 1 м² варильної частини досягає 1800 кг на добу, що в чотири рази перевищує цей показник для газових печей і, відповідно, дає можливість істотно збільшити продуктивність на одиницю виробничої площі, або різко зменшити габарити печі.

Останнім часом поширеними стали додаткове електричне нагрівання та електроплавлення шихти для того, щоб верхній шар маси залишався холодним. Для електрообігрівання можна використовувати комбіновану газОВО-електричну схему, або суто електричну [2, 3]. Метод плавлення з холодним верхнім шаром знижує рівень шкідливих викидів в атмосферу, а додаткове електричне нагрівання звичайно застосовується для одержання скла підвищеної якості і збільшення продуктивності печей. В обох випадках електрична енергія використовується методом безпосереднього протікання електричного струму через розігріту скломасу. Тому важливо мати інформацію про фактори, що впливають на електричний опір скломаси.

Метою роботи є встановлення факторів та параметрів, що впливають на матеріал електродів для обігрівання електропечей та продуктивність останніх.

Методи досліджень і матеріали. Для визначення залежності параметрів технологічного регулювання апаратури під час виробництва скла застосовували математичний аналіз та розрахунок, враховуючи конкретні характеристики сировини для виробництва скла.

Результати досліджень. Електропровідність скла залежить від сировини, тобто від компонентів та домішок у ній. Присутність в оксидних сполуках катіонів лужних та лужно-земельних металів підвищує електропровідність скла, а разом з цим і підвищенням температури. Відтак придатність електротехнічного скла визначається температурою (T_{K100}), за якої скло має питому електропровідність $1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м⁻¹. Питома об'ємна електропровідність скла визначається рухом іонів основної речовини та іонів домішок, що входять до його складу. Найбільший внесок у забезпечення провідності роблять іони лужних металів, які мають найменші розміри і, завдяки цьому, можуть максимально вільно рухатись всередині структурної решітки. Найрухомішими є іони літію натрію. Залежність питомого об'ємного опору скла від температури має велике значення для вибору напруги живлення електропечі та визначення параметрів технологічної апаратури, оскільки останні впливають на фізико-хімічні властивості та якість одержаного кінцевого продукту.

Між температурою (T) скла та його електропровідністю (ρ) існує така математична залежність:

$$Y = \frac{n_0 q^2 \delta^2 \gamma}{3KT} e^{-\frac{V_0}{KT}} \quad (1)$$

де n_0 – кількість іонів в одиниці об'єму; q – заряд іона; δ – віддаль між двома потенційними ямами структурної решітки; γ – частота коливань іона ($\gamma = 10^{12} - 10^{13}$); K – стала Больцмана; T – абсолютна температура; V_0 – ефективна енергія активації.

Питомий об'ємний опір різних сортів скла дуже змінюється з температурою, так властивість скла як ізолятора характеризується температурою t_{e-100} (в °C), за якої $\rho = 100$ МОм·см. Згідно з рекомендаціями [4], розрахунок питомого об'ємного опору скла при заданій температурі може бути проведений так: спочатку необхідно визначити питоми опір при базовій температурі 300 °C (всі величини в формулі повинні бути виражені в молярних процентах.):

$$\lg \rho_{300} = (75-a) 0,08 + (38-a) 0,05 a_K/a + [0,25 - (a_K/a - 0,5)^2] 6,4 + 0,018 b_{MZ} + (30-a)^2 (b_c + b_{BP}) / 7300 + 0,05 b_c + 0,08 b_{BP} - 0,05 c + (30-a)^2 d/6000 + 0,04d + 0,015 b. \quad (2)$$

де a – величина вмісту лужних оксидів; a_K – вміст K_2O ; b – вміст всіх RO ; b_{MZ} – величина вмісту MgO та ZnO ; b_c – вміст CaO ; b_{BP} – величина вмісту BaO та PbO ; c – вміст Al_2O_3 ; d – вміст B_2O_3 .

Температурна залежність $\lg \rho - 1/T$ виражається прямою лінією, для розрахунку T_{e-100} (в К) і опору при інших температурах знаходять $\lg A$ – величину відрізка, що відтинається на осі ординат при $(1/T) = 0$ прямої, що характеризується функцією $\lg \rho = f(1/T)$. Після цього потрібно вирахувати $\lg A$, який дорівнює

$$\lg A = (30+a) 0,03 + [0,25 - (a_K/a - 0,5)^2] 0,22a + 0,08 b_{BP} - 0,01 c. \quad (3)$$

Відтак, питомий опір скломаси при потрібній нам температурі і $T_{\infty-100}$ визначається за емпіричними формулами

$$\lg \rho_t = (\lg \rho_{300} + \lg A) \cdot \frac{573}{t + 273} - \lg A, \quad (4)$$

$$t_{\infty-100} = \frac{(\lg \rho_{300} + \lg A)573}{8 + \lg A} - 273 \quad (5)$$

Знаючи питомий об'ємний опір скломаси та геометричні параметри варильної печі, можемо визначити величину робочої напруги та інші технологічні параметри. Для варіння скла застосовують електричні печі опору (прямого і непрямого нагрівання) та індукційні печі. При протіканні електричного струму електрична енергія перетворюється в теплову. В існуючих електропечах використовується електроенергія при напрузі в межах 50–150 В і значенні струму до 10000 А. Розрізняють печі з холодною верхньою частиною варильного басейну (скло вариться під щільним шаром шихти) та гарячою верхньою частиною варильного басейну (скло вариться під нещільним шаром шихти). Другий тип печей – значно більші за розміром та продуктивністю. Крім того печі класифікують за розміщенням електродів (печі з однорядним розміщенням електродів та з багаторядним розміщенням електродів, з електродами, розміщеними на днищі) та видом підведеної електроенергії (одно-, дво- та трифазні). При однорядному розміщенні електродів енергія вводиться в одній зоні, а далі поширюється за рахунок конвективних потоків по всьому басейну; у цьому випадку важко впливати на температуру зони освітління незалежно від температури зони варіння. При багаторядному розміщенні електродів можна впливати на температуру кожної зони незалежно, а також стабілізувати температуру скломаси між рядами.

Оскільки варіння скла відбувається при температурі 1444–1700 °С, то потрібно звернути особливу увагу також на матеріал електродів. Досвід роботи деяких підприємств [2] вказує на можливість використання молібденових електродів, котрі, проте, мають високу собівартість. Також застосовують електроди-блоки з діоксиду олова (при багаторядному розміщенні), скажімо для варіння, так званого, свинцевого кристалу. Можливо, конкурентнішим матеріалом може бути металокераміка з вольфрамовою решіткою та графітовим заповненням, котра значно дешевша. Проте, досвід експлуатації цього матеріалу ще недостатній і питання про можливість дифузії молекул графіту в скломасу ще також вивчене мало. Отже, в кожному конкретному випадку необхідно враховувати як економічні, так і експлуатаційні характеристики електродів.

Використання електроенергії у виробництві скла зумовлено зокрема тим, що окремі технологічні процеси одержання скла з певними властивостями вимагають застосування як енергоносія тільки електроенергії. Наприклад, закалювання скла, за якого скло розігріте до певного пластичного стану, а потім різко охолоджується для підвищення механічної та термічної стійкості скла. Це досягається використанням тільки електричних печей або шахтних закалювальних агрегатів, і скло одержане таким способом (а не обпалюванням) в 4–6 разів міцніше. Крім того, виробництво скляного лабораторного обладнання та скляних хімічних трубок вимагає застосування електроенергії, оскільки дуже важливим є те, щоб вироби формувались з однорідно та рівномірно нагрітої сировини для уникнення дефектів, що продовжить в майбутньому термін експлуатації одержаних виробів. Розроблено одержання полірованого скла, шляхом формування неперервної стрічки на розплаві металу, синтез біоактивних матеріалів на основі скла для застосування в медицині. Ці технології застосовують як теплоносії тільки електричну енергію.

Важливим фактором під час виробництва скла є також значний вплив хімічного складу скла на його електричний опір. Так, невеликі домішки лужних оксидів до кварцового скла зменшують його питомий опір на 1–2 порядки. Тому в умовах можливих змін як сировина, або, під час виробництва скла різних сортів, необхідно передбачити наявність регульовального пічного трансформатора (при багаторядному розташуванні електродів передбачається трансформатор для кожного ряду чи блока). Електропічні трансформатори мають вторинну обмотку секціоновану з можливістю перемикання їх виводів, що дозволяє змінювати напругу на вторинній обмотці та

отримувати розрахункові значення напруг на електродах. Ці силові трансформатори за видом охолодження бувають сухі (з атмосферним охолодженням) та з масляним охолодженням.

Висновки. Використання електроенергії для плавлення скла залежить від багатьох факторів, насамперед, економічних, пов'язаних з вартістю палива, електроенергії, обладнання тощо. Однак здебільшого застосування електроенергії для нагрівання чи додаткового нагрівання зумовлене екологічними та технологічними міркуваннями. У багатьох країнах Європи та Америки вже вводяться в дію або розробляються законодавчі акти, що регламентують викиди різних окисів в атмосферу. Як було зазначено, окремі технології під час виробництва скла вимагають застосування тільки електроенергії. Тому виробники мають вибір: або знижувати продуктивність та вводити систему газоочищення, або використовувати електроплавлення і додаткове електричне підігрівання, щоб вдосконалювати товарні продукти.

1. *Эффективное использование электроэнергии / Под ред. К. Смита. – М.: Энергоиздат, 1981. – 400 с.* 2. *Комар А.Г., Баженов Ю.М., Сулименко Л.М. Технология производства строительных материалов. – М.: Высш. шк., 1990. – 445 с.* 3. *Рыбьев И.А. Строительное материаловедение. – М.: Высш. шк., 2003. – 701 с.* 4. *Мазурин О.В. Электрические свойства стекла // Труды Ленинградского технологического института им. Ленсовета. – Л.: Госхимиздат, 1962.* 5. *Штерн А.В. Стекланные изоляторы. – М.: Энергия, 1973. – 200 с.*

УДК 620.179.14

М.А. Яцун, А.М. Яцун

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕМА,
Львівський національний аграрний університет,
кафедра електротехнічних систем

ВЛАСНА І ВЗАЄМНА ПЕРЕХІДНІ ІНДУКТИВНОСТІ НАКЛАДНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

© Яцун М.А., Яцун А.М., 2009

Досліджені чутливості граничних значень і коефіцієнтів загасання внесеної індуктивності обмотки збудження накладного екранованого кільцевого первинного перетворювача прямокутного поперечного перерізу над провідною пластиною як об'єктом контролю до її магнітної проникності і електричної провідності після вимикання первинного вимірної кола з конденсатором від джерела постійної напруги.

Explored to the sensitiveness of extremes values and coefficients of fading borne inductance of puttee of excitation of the superimposed screened circular primary transformer of rectangular transversal to the cut above a leading plate as control object to its permeance and electric conductivity after the shutdown of primary measurable circle with a condenser from the source of direct voltage.

Постановка проблеми. Інформативними параметрами первинного перетворювача під час контролю геометричних розмірів і фізико-механічних параметрів електропровідних матеріалів, виробів і деталей імпульсним вихрострумівим методом є його внесені перехідні власна і взаємна індуктивності збудливої і вимірної обмоток і їхні чутливості до параметрів об'єкта контролю з метою виявлення оптимальних моменів часу для відбору і розв'язки багатопараметрової інформації.