

УДК 62-9

Визначено причини вібрації, що виникає під час роботи індукційних печей. Наведена методика визначення основних зусиль, що викликають вібрацію, з метою врахування її негативного впливу при розрахунках міцності конструктивних елементів індукційних установок, а також на стан санітарно-гігієнічних умов виробництва

Ключові слова: вібрація, електродинамічні зусилля, індуктор, шум

Определены причины вибрации, которая возникает во время работы индукционных печей. Приведена методика определения основных усилий, которые вызывают вибрацию, с целью учета ее отрицательного влияния при расчетах прочности конструктивных элементов индукционных установок, а также на состояние санитарно-гигиенических условий производства

Ключевые слова: вибрация, электродинамические усилия, индуктор, шум

The causes of vibration that occurs during operation of induction furnaces are defined. The method for determination of the main efforts that cause vibration, to account for its negative effect when calculating the strength of structural elements of induction units and the condition of sanitary-hygienic conditions of production are given

Keywords: vibration, electromagnetic force, inductor, noise

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙ ІНДУКЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ НА СТІЙКІСТЬ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕЧЕЙ

А. В. Єршов

Доктор технічних наук, професор
Кафедра «Фізики»*
Контактний тел.: (061) 769-83-55

Ю. Е. Пачколін

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра «Електричні машини»*
Контактний тел.: (061) 233-00-24

І. М. Коцур

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра «Електричні машини»*
Контактний тел.: (061) 769-84-11

О. О. Бондаренко

Аспірант
Кафедра «Електричні апарати»
*Запорізький національний технічний університет
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063
Контактний тел.: (0612) 34-64-19

Вступ

Необхідність боротьби з вібраціями, що виникають під час роботи електротермічних комплексів, в яких використовується індукційний спосіб нагрівання та плавлення металів, спонукає до виявлення причин їх появи. Основною причиною, яка викликає вібрації електроенергетичного устаткування, є електродинамічні зусилля, що виникають під час роботи. Точність та міцність виготовлення вузлів печей напряму пов'язана з умовами появи збудження коливальних та їх розповсюдження на все устаткування.

Постановка завдань дослідження та визначення умов для їх реалізації

Вирішення цієї задачі пов'язано з питаннями підвищення надійності роботи, довговічності, а також ремонтоздатності електроустаткування.

Урахування всіх факторів, які викликають вібрацію, є головним завданням як на стадії проектування електротермічних комплексів, так і під час монтажу та проведення пусконаладжувальних робіт.

При проведенні розрахунків індукційних печей дуже часто не враховується вплив вібрації на конструктивні елементи, що призводить до появи таких негативних явищ, як підвищений рівень шуму, розтріскування з'єднань виводів індуктора зі струмопідвідними провідниками, а також руйнування фундаменту та корпусних елементів печі. Як наслідок - зниження коефіцієнту корисної дії печі, суттєве погіршення умов праці, а також передчасний вихід з ладу устаткування.

Основна частина

Індуктори, які призначені для нагрівання та плавлення металів, завжди зазнають вібрації, обумовлені електродинамічними зусиллями. Далі розглядаються

вібрації, що виникають у результаті взаємодії струмів в індукторі й металі, який нагрівається, а також власні сили від взаємодії струму в індукторі, який їх індукуює, й поля в ньому, що визначають симетричне механічне навантаження на індуктор та аксіальні сили між витками, що призводять до відчутних вібрацій. Але при проектуванні індукторів для нагрівання тіл різної форми необхідно приймати до уваги малу стійкість ділянок індуктора. Як показує досвід, сильна вібрація в цьому випадку призводить до неминучого руйнування устаткування й супроводжується шумом, що значно перевищує допустимі санітарні норми для виробничих приміщень. Треба мати на увазі, що основний інтерес представляє не механічна міцність індуктора з урахуванням максимально можливих при даній напруженості магнітного поля статичних напругах вигину, а стійкість індуктора відносно виникнення вібрацій. Питання динамічної стійкості будь-якої конструкції можна успішно розглядати лише маючи у своєму розпорядженні миттєві характеристики збурень, що викликають її рух. У цьому випадку такими є електродинамічні зусилля, які визначаються за формулою (1):

$$\vec{F} = \mu\mu_0 \left[\frac{1}{2} \text{grad } \vec{H}^2 - (\vec{H}\nabla)\vec{H} \right], \quad (1)$$

де μ , μ_0 - відповідно відносна та абсолютна магнітна проникність;

\vec{H} - напруженість магнітного поля.

Допускаючи, що магнітне поле в зазорі між індуктором і завантаженням плоскопаралельне, напруженість магнітного поля поза індуктором дорівнює нулю, при гармонійному характері струму індуктора тиск, що діє на індуктор по всьому периметру, можна визначити з достатньою достовірністю за формулою (2):

$$Q = \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{w}{l} \right)^2 I^2 (1 + \cos 2\omega t), \quad (2)$$

де w , l , I - число витків, довжина та діюча величина струму індуктора.

Максимальну величину амплітуди тиску, Н/м^2 , при нагріванні тіл різної форми з різнорідних металів визначають за допомогою співвідношення (3):

$$Q_{\text{max}} = 3,15 \cdot 10^{-4} \frac{P_s}{\sqrt{\rho\mu f}}, \quad (3)$$

де P_s - поверхнева густина потужності, яка поглинається заготовкою, котра нагрівається, Вт/м^2 ;

ρ - питомий опір матеріалу заготовки, $\text{Ом}\cdot\text{м}$.

Співвідношення (3) показує, що при одній і тій же густині потужності максимальний тиск зазнаватиме індуктор, призначений для нагрівання мало- або немагнітних металів з малим питомим електроопором на одній і тій же частоті струму.

З точки зору динамічного розрахунку індуктор у поперечному перерізі представляє пружну рамку, вузли якої не зміщуються. Використовуючи наближений «метод зведення» таку рамку, яка представляє систему з нескінченним числом ступенів волі, можна звести до

одного ступеня волі, а також визначити амплітуду коливань умовної точки всередині індуктора

$$\phi = \phi_{\text{ст}} [1 + K_d \cos(2\omega t - \beta)], \quad (4)$$

де $\phi_{\text{ст}}$ - статичний прогин;

ω_0 - кругова частота власних коливань індуктора;

K_d - коефіцієнт динамічності;

$$K_d = \left(\sqrt{1 - \left(\frac{2\omega}{\omega_0} \right)^2} + \left(\frac{4n\omega}{\omega_0} \right)^2} \right)^{-1}; \quad (5)$$

β , n - коефіцієнти, які визначаються в'язкістю системи.

Звичайно динамічний розрахунок конструкції полягає у визначенні коефіцієнта динамічності (K_d). При проектуванні можна певним чином вибрати параметри, що визначають механічний імпеданс індуктора, щоб мінімізувати K_d . Оскільки в'язкість може значно вплинути на K_d лише в зоні резонансу, то основна увага необхідно звернути на ω_0 , котра впливає як на K_d , так і на статичний прогин. Характерно, що під дією даної збурювальної сили неможливо знизити прогин індуктора менше його величини при статичному навантаженні.

Можна визначити рівень звукового тиску (шуму), що виникає в навколишньому середовищі

$$p = 20 \lg \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{d\phi}{V_0 dt} \right], \quad (6)$$

де V_0 - ефективна величина коливальної швидкості на порозі чутності, яка для повітря дорівнює $5 \cdot 10^{-8}$ м/с.

Слабким шумом вважають шум 50 фон, або порядку 60 дБ на 100 Гц. Найефективнішою є боротьба з шумом за рахунок зменшення амплітуди вібрацій, що здійснюється віброгасінням або вібропоглинанням. Матеріалом, що вдало сполучає обидві ці властивості, а також служить гарним електроізолятором, є склопластик. Незначне збільшення товщини склопластикової оболонки суттєво зменшують прогини. Більш точні розрахунки товщини склопластикової оболонки здійснюються за спеціальною методикою з використанням формул (1) – (6). В окремих випадках для отримання позитивного результату доводиться підсилювати міцність кріплень не тільки індуктора, а й пічного трансформатора та дроселів. На рисунку 1 наведена конструкція індукційної печі, показані напрямки дії зусиль, що створюють вібрації. Індуктор, армований склопластиком, укладений у залізобетонний корпус круглої форми, що має велику природну твердість, яка зменшує вібрацію. На рисунку 2 наведено графік залежності звукових коливань від частоти струму індуктора.

Дослідження, які проведені на промисловій базі заводу «Мотор Січ» дали змогу переконатися у вірності теоретичних аспектів поставленої проблеми. Під час проведення випробувань досліджувалася робота індукційних печей ИПА (індукційна піч для плавлення алюмінію), ИПМ (для плавлення магнію), ИЧ6 (для чавуну і сталі), які працюють на частоті 50 Гц, печі АЯКС (Америка, 1 т, 1 кГц), ТПЧ800 (сталеплавильна 1 кГц),

УППФ вакуумна для сталі та сплавів (2,4 кГц), СВ016 (вакуумна для сталі 2,4 кГц), що сприяло виявленню залежності параметрів та характеру вібрацій від частоти струму, яким живиться індуктор.

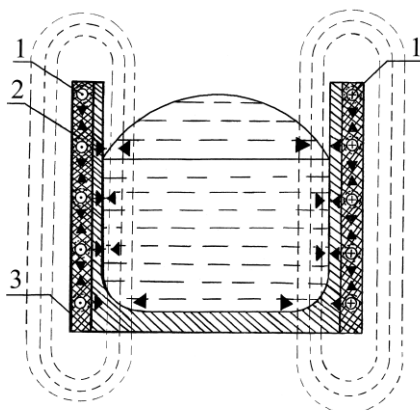


Рис. 1. Напрямок електродинамічних сил, які діють в індукційній печі: 1 – витки індуктора; 2 – зона можливої вібрації витків індуктора; 3 – склопластик; трикутником показаний напрям дії електродинамічних сил, які викликають вібрації

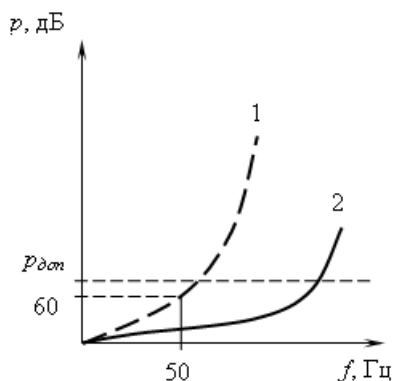


Рис. 2. Залежність рівня шуму від частоти живлення індуктора: 1 – без додаткового зміцнення кріплень індуктора; 2 – зі зміцненням кріплень індуктора

Тривале спостереження за технічним станом печей у різних умовах експлуатації показало наступне:

- зі збільшенням частоти струму живлення значно зростає шум, що суттєво перевищує допустимі норми і негативно впливає на умови праці;
- зменшення частоти сприяє появі руйнівних коливань, які призводять до аварійних ситуацій.

Висновок

Вдале застосування отриманих результатів проведеного дослідження при проектуванні або модернізації існуючих електротермічних комплексів, що використовують індукційне нагрівання, дасть змогу:

- збільшити міжремонтні цикли роботи електротермічних комплексів та суттєво зменшити експлуатаційні витрати;
- не допустити зменшення коефіцієнта корисної дії плавильного агрегату та скоротити витрати електроенергії;
- покращити санітарно-гігієнічні умови праці обслуговуючого персоналу.

Література

1. Курбатов, П.А. Численный расчёт электромагнитных полей [Текст] / С.А. Аринчин. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 167 с.
2. Электротехнологические промышленные установки: Учебник для вузов [Текст] / И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский; Под редакцией А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.
3. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов [Текст] / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр; Под. ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 328 с.
4. Теорія електричних та магнітних кіл: Навчальний посібник. – Хмельницький: ТУП, 2003. – 199 с.