

# ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНА ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ ПІЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДУГОВИХ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПЕЧЕЙ

Галько С.В

Таврійська державна агротехнічна академія

*Dynamic stability of the electrooven transformer with asymmetrical secondary currents supply the arc steel-smelting furnaces, working in an asynchronous mode is considered. The technique of an estimation of dynamic stability of the transformer is offered. The mathematical model of definition of allowable time of transient in abnormal operating modes of the transformer is received.*

**Постановка проблеми.** Як відомо, електропічний трансформатор (ЕПТ) дугових сталеплавильних печей, як власний випадок загального трансформатора, має два типа статичної стійкості, що характеризують максимальне можливе навантаження та два типа динамічної стійкості, що характеризують максимальний граничний перехід від одних умов роботи до інших (наприклад, при перемиканні ступіней ЕПТ, запаленні дуги, виникненні "мертвої" або "дикої" фази, експлуатаційних к.з. по одній, двом або трьом фазам та інш.). Стосовно до ЕПТ з несиметричним вторинним струмопідводом найбільш поширеним на практиці з динамічних режимів його роботи є *асинхронний режим*, коли ЕПТ працює з деяким еквівалентним кутом  $\varphi_e \rightarrow \min \Delta\delta$ , який і розглянемо у роботі. Динамічна асинхронна стійкість визначається динамічною величиною перехідних струмів і якщо їх величина перевищує гранично допустимі значення це приводить до порушення роботи електропічного агрегату і виходу його із строю. Тому дослідження направлені на розробку адекватних методик аналізу динамічної стійкості ЕПТ є *актуальною задачею*.

**Аналіз результатів попередніх досліджень.** Дослідженню роботи в динамічному асинхронному режимі ЕПТ присвячено багато робіт сучасних вчених (Лозинського О.Ю., Труфанова І.Д., Паранчука Я. М. та інш.). На основі робіт цих вчених, автором цієї статті запропоновано вести оцінку динамічної стійкості за допомогою функціональних кутів, що значно спрощує цей аналіз. Крім того, динамічна величина перехідних струмів є функцією якості ніпельного з'єднання електродів, яка до теперішнього часу вважалася, як та, що не мала великого впливу на ці струми. В свою чергу якість з'єднання електродів залежить від параметрів ніпельного з'єднання, якості його механічної обробки, моменту скручування та інших факторів.

Тому, **метою статті** є розробка методики аналізу електроенергетичної динамічної стійкості електропічного трансформатора дугових сталеплавильних печей в аномальних режимах роботи.

Для статичної електромагнітної машини, якою являється ЕПТ кут  $\Delta\delta = \varphi_e - \pi/2$ . В подальшому аналізі індекси  $\Delta$  та "е" – опущені.

Рівняння електромагнітної рівноваги має вигляд:

$$Q_e \frac{(\Delta\delta(t))^2}{2} = \int_{\delta_0}^{\delta} (Q_1 - Q_2) d\delta(t), \quad \Delta\delta(t) = f(sn(m \cdot L), cn(m \cdot \varphi)), \quad (1)$$

де  $Q_1, Q_2, Q_e$  – відповідно, енергія первинного, вторинного контурів та еквівалентна;

$sn(m \cdot L), cn(m \cdot \varphi)$  – відповідно еліптичні синус і косинус Якобі [1, 2].

$m$  – коефіцієнт, що характеризує жорсткість елементів різьбового ніпельного з'єднання;

$L$  – глибина ніпельного гнізда;

Час перехідного процесу – час зміни динамічних процесів  $t_n$  дорівнює:

$$t_n = \int_{\delta_0}^{\delta} \frac{d\delta}{\sqrt{R(\delta)}}, \quad (2)$$

де  $R(\delta) = \frac{2}{Q_e} \int_{\delta_0}^{\delta} (Q_1 - Q_2) d\delta$  – неповний еліптичний інтеграл 1-го роду раціональної функції двох змінних (струму і напруги) у вигляді поліному 4-ого ступеня без кратних нулів в нормальній формі Лежандра.

Розв'язавши наближено (2), отримаємо залежність  $\delta = f(t)$ . Ця функція буде періодичною або аперіодичною в залежності від виду корнів (дійсних або мнимих при  $\delta > \delta_0$ ) рівняння  $R(\delta) = 0$ . Згідно з (2) величина  $\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\delta}{dt}$  (індекс "n" опущений для спрощення запису) дорівнює:

$$\left\{ \frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2}{Q_e} \int_{\delta_0}^{\delta} (Q_1 - Q_2) d\delta}; \frac{d\delta}{dt} = \sqrt{R(\delta)}; R(\delta) = \frac{2}{Q_e} \int_{\delta_0}^{\delta} (Q_1 - Q_2) d\delta. \right\} \quad (3)$$

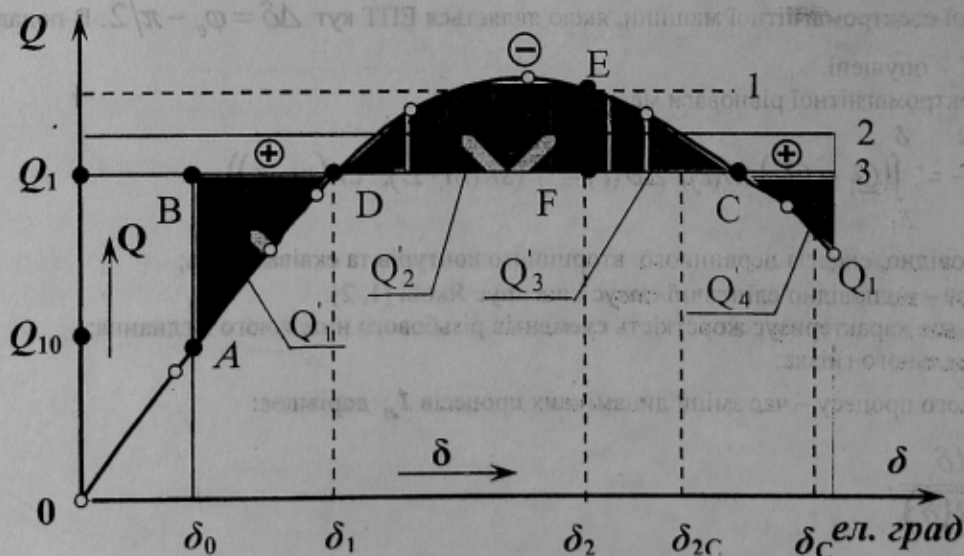
В (3) величина  $\frac{1}{2} Q_e \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \frac{1}{2} Q_e R(\delta)$  представляє собою "умовну кінетичну енергію" вторинного струмопідвода по відношенню до електромагнітного поля первинної електромагнітної системи ЕПТ, що рухається синхронно. Так же як і при коливальному русі механічної системи, "умовна кінетична енергія" вторинного струмопідвода  $\frac{Q_e}{2} \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2$  є функцією (умовою витрат) "потенціальної енергії" і дорівнює заштрихованій площі ABD на рис. 1. На рис. 1 позначено:  $\delta_0$  - кут тракту до накиду навантаження;  $\delta_1$  - кут, що відповідає прикладеному навантаженню при  $Q_1 = Q_2$ ;  $\delta_2$  - максимальний кут коливань.

Повна "кінетична енергія" вторинного струмопідвода при коливальному русі (передачі енергії) змінюється на величину:

$$\frac{Q_e}{2} [\omega_c^2 - \omega_2^2] = \frac{Q_e}{2} \left[ 2\omega_c \frac{d\delta}{dt} - \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right], \quad (4)$$

де  $\omega_c$  - синхронна швидкість руху поля первинного електромагнітного контуру;

$\omega_2 = \omega_c - d\delta/dt$  - швидкість руху поля вторинного електромагнітного контуру.



$$Q_2' + Q_3' = Q_1' + Q_4'; 1 - Q_2' + Q_3' < Q_1'; 2 - Q_2' + Q_3' = Q_1'; 3 - Q_2' + Q_3' > Q_1'.$$

Рисунок 1 - Зона динамічної стійкості ЕПТ. До закону площ при миттєвій зміні навантаження.

Відношення умовної кінетичної енергії  $\frac{Q_e}{2} \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2$  до реальної, що накопичується та витрачається вто-

ринним струмопідводом при коливальному русі (передачі енергії), дорівнює  $\frac{\omega_c - \omega_2}{\omega_c + \omega_2}$ , тобто дорівнює відно-

шенню середнього значення за час коливання до середнього значення за час коливання швидкостей контурів.

При початковому куті  $\delta_0$  (рис. 1) різниця між величиною прикладеної енергії  $Q_1$  первинного контуру і  $Q_2$

вторинного контуру дорівнює максимуму (величина  $\frac{d\delta}{dt} = 0$ ). При подальшому збільшенні ( $\frac{d\delta}{dt} > 0$ ) не-

узгодження величини  $Q_2$  буде зменшуватися і дійде до нуля у той момент, коли вся накопичена енергія вто-  
ринного контуру буде витрачена. Це відповідає моменту часу, коли площі ABD та DEF рівні між собою (рис. 1)  
і кут  $\delta = \delta_2$ . Даний момент часу відповідає часу закінчення півперіоду коливань. При подальшому русі кут  
 $\delta$ , досягнувши значення  $\delta_2$  почне зменшуватися.

При дослідженні накиду навантаження в зоні збереження динамічної стійкості на основі рис. 1 маємо  
слідуючи данні для оцінювання величини  $R(\delta)$ :

$$\{R(\delta) = 0, \text{ при } \delta = \delta_0; R(\delta) = 0, \text{ при } \delta = \delta_2; R(\delta) = \max, \text{ при } \delta = \delta_1; Q_1 = Q_2.\} \quad (5)$$

Проміжні значення параметра  $\delta_i$ , котрий приймається за відповідний корінь системи рівнянь (5), визначаються  
з умови  $Q_{ei} = \text{const}$ :

$$Q_{ei}(\delta - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta} Q_1 d\delta = 0 \quad (6)$$

Якщо інтеграл  $\int_{\delta_0}^{\delta} Q_1 d\delta$  відомий у математичному вигляді (як функція від  $\delta$ ), то корні рівняння (6)

визначаються на перехресті прямої  $Q_2(\delta - \delta_0)$  з

кривою  $Q_2 = f(\delta) = \int_{\delta_0}^{\delta} Q_1 d\delta$ , яка побудована в

функції від  $\delta_0$  (рис. 2) [3]. Якщо пряма  $Q_2(\delta - \delta_0)$

пересікає криву зміни інтеграла  $\int_{\delta_0}^{\delta} Q_1 d\delta$  тільки в

точці, яка відповідає куту  $\delta_0$  (рис. 2, пряма 1), то це

відповідає випадку неузгодження синхронного руху  
передачі енергії від первинного контуру до  
вторинного, так як в цьому випадку не існує

іншого кута  $\delta_2$ , при якому величина

$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{R(\delta)} = 0$ . Межа динамічної стійкості

передачі енергії відповідає випадку, коли пряма  
 $Q_2(\delta - \delta_0)$  є дотичною до кривої, що представлена

інтегралом  $\int_{\delta_0}^{\delta} Q_1 d\delta$  (рис. 2, пряма 2). В цьому

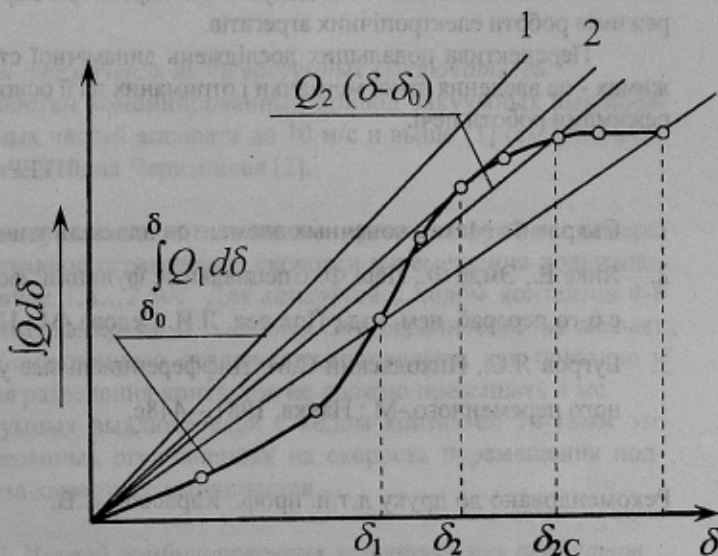


Рисунок 2 – Умови збереження режиму  
синхронної передачі навантаження при його  
миттєвій зміні від  $Q_1$  до  $Q_2$ . Граничне  
навантаження відповідає рівню прямої 2.

випадку  $\delta_2 = \delta_c$ , тобто співвідношення між кутами  $\delta_0, \delta_2, \delta_c$  вказує на ступінь стійкості режиму ЕПТ, що розглядається.

Для аналітичного дослідження поставимо питання, чи є можливість заміни дійсного виразу  $R(\delta)$  (2) наближеним, який має ті ж корні  $\delta_0, \delta_2, \delta_c$  та максимум тієї ж величини при куті  $\delta_1$  що й дійсний вираз  $R(\delta)$ . Такий наближений вираз для  $R(\delta)$  буде відповідати випадку заміни дійсної кривої електромагнітної потужності  $Q_1 = f(\delta)$  поліномом, який співпадає в точці  $\delta = \delta_1$  з дійсною кривою потужності і який створює на рис. 1 з лінією прикладеного зовнішнього імпульсу зміни навантаження рівновеликі площі ABD та DEF, тобто для аналізу приймаємо:

$$R(\delta) = c(\delta - \delta_0)(\delta - \delta_c), \quad (7)$$

де коефіцієнт  $c$  визначається з умови рівняння наближеного рівняння (6) і дійсного (3) при  $\delta = \delta_1$ .

При  $\delta = \delta_1$  величина  $d\delta/dt$  повинна бути рівна:

$$\left( \frac{d\delta}{dt} \right)_{\delta = \delta_1} = (\delta_1 - \delta_0)\omega_0, \quad (8)$$

де  $\omega_0$  - задана частота, що характеризує максимальне значення імпульсу енергії при мінімальном неузгодженні у відповідності з (3).

В цьому випадку на основі (3), (7), (8) для коефіцієнта  $c$  маємо:

$$c = \frac{\delta_1 - \delta_2}{(\delta_2 - \delta_1)(\delta_c - \delta_1)} \omega_0^2. \quad (9)$$

Підставляючи (7) в (2) отримаємо зв'язок між кутом  $\delta$  і часом перехідного процесу  $t$ :

$$t = \int_{\delta_0}^{\delta} \frac{d\delta}{\sqrt{c(\delta - \delta_0)(\delta - \delta_2)(\delta - \delta_c)}}. \quad (10)$$

В результаті проведеного аналітичного аналізу, можна зробити **висновок**, що методика і результат даного аналізу, на наш погляд, можливо використовувати для дослідження режимів навантаження ЕПТ в межах динамічної роботи в функції параметрів електротехнічного обладнання теплоенергетичного тракту потужних дугових сталеплавильних печей для визначення допустимих параметрів коротких замикань, "диких" і "ледачих" фаз та інш. порушень режимів роботи електропічних агрегатів.

Перспектива подальших досліджень динамічної стійкості електропічних трансформаторів в аномальних режимах - це введення даної методики і отриманих на її основі математичних моделей в закон керування (регулювання) режимами роботи печі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Сьярле Ф. Метод конечных элементов для эллиптических задач.-М.: Мир, 1980. - 512 с.
2. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции: формулы, графики, таблицы; изд. второе, стереотипн.; Пер. с 6-го перераб. нем. изд.; Под ред. Л.И. Седова.-М.: Наука, 1968.-344с.
3. Бугров Я.С., Никольский С.М. Дифференциальные уравнения, кратные интегралы, ряды, функции комплексного переменного.-М.: Наука, 1981.-448с.

Рекомендовано до друку д.т.н. проф. Карасьом С.В.