

## ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПОЗДОВЖНІХ КОЛИВАНЬ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ НА ЇХ НАДІЙНІСТЬ

Шевченко В. В.

*Національний технічний університет "ХПИ"*

*Запропоновано в якості фактора, що визначає надійність енергозабезпечення споживачів промислових і аграрних підприємств, використовувати надійність роботи турбогенераторів електростанцій.*

**Постановка проблеми.** Енергетична незалежність будь-якої країни визначається рівнем розвитку електроенергетики, її надійністю і відповідністю світовому рівню. Основними споживачем електричної енергії є промислові підприємства, електротранспорт, сільськогосподарські споживачі, чимала частина електроенергії йде на забезпечення побутових енергоспоживачів міст і селищ. Промислові підприємства є зосередженими споживачами, особливістю електропостачання сільськогосподарських споживачів є велика кількість електроприймачів і їх значна розосередженість по території. Але в будь-якому випадку основною вимогою до роботи енергосистеми є надійність енергопостачань, яка, в свою чергу, залежить від якості і надійності роботи електрообладнання (ЕО).

**Аналіз останніх досягнень.** У національній енергетиці в даний час стоїть питання не просто забезпечення надійності та безпеки експлуатації ЕО електростанцій, а про саму можливість його технічної експлуатації. Встановлене ЕО на ТЕС і АЕС, зокрема, турбогенератори (ТГ), відпрацювало свій ресурс і потребує заміни. Але економічне становище в Україні, як і в усьому світі, висока вартість ЕО робить цю заміну неможливою. Тому в Україні ведуться тільки часткові роботи по модернізації ЕО блоків електростанцій, ТГ і їх окремих елементів, а не повна заміна. Оцінка технічного стану ТГ на блоках станцій - основних джерел електроенергії в Україні, підтвердила можливість продовження терміну їх експлуатації понад часу, встановленого заводом-виробником. Але це можливо тільки при своєчасному виявленні явних і прихованих дефектів, повноті і якості їх усунення, виборі оптимальних режимів роботи, своєчасному проведенні ремонтів і модернізації [1]. Точного методу оцінки залишкового ресурсу ТГ в даний час не існує. Результати обстежень, отримані на блоках електростанцій в період експлуатації і при ремонтах ТГ, які були виготовлені на ДП "Завод "Електроважмаш" (Україна, м. Харків), дозволяють стверджувати, що найбільш точні дані можуть бути отримані при використанні комплексного обстеження ТГ з організацією *on-line* діагностики вузлів, що мають за статистичними даними найбільшу кількість відмов: сердечники і обмотки статора і ротора, системи кріплення осердя до корпусу. У свою чергу встановлено, що необхідно обмежувати число каналів інформації про якість роботи ТГ для зниження навантажень на людину-оператора [2]. Проведений нами аналіз показав, що найбільш інформативним каналом є контроль вібрації ТГ [3].

**Мета статті.** Пропонується встановити спосіб зниження поздовжніх коливань шихтованого осердя

статора ТГ, які є важливим показником його надійної роботи в стані зносу для стабільних поставок електроенергії споживачам.

**Основні матеріали досліджень.** Осердя статора ТГ набирається з листів електротехнічної сталі, ізолюваних з двох сторін і пройшовших термічну обробку. По поверхні спинки осердя листи замикаються стяжними призмами.

Тому при пошкодженні ізоляції листів утворюється контур, в якому наводиться ЕРС і виникає вихровий струм, що призводить до додаткового нагрівання в контурі замикання. У перехідних режимах роботи ТГ, які супроводжують перевід ТГ в неномінальні режими, спостерігаються кидки струму (наприклад, при швидкому наборі навантаження), що підсилює швидкість зносу ізоляції сегментів осердя через виникнення вогнищ локального перегріву. Крім того, пошкодження лакових плівок ізоляції листів осердя можуть виникати з таких причин:

- через вібрацію листів активної сталі осердя, що підсилює їх механічний знос;
- через неякісний ремонт (поява забоїв і слідів зашліфовки при перекліюванні обмотки);
- через порушення технології виготовлення осердя (залишені задирки на кромках листів осердя, потрапляння сторонніх струмопровідних предметів між листами, сегментами і в пази статора);
- через потрапляння сторонніх предметів в розточку між статором і ротором в процесі роботи ТГ.

Несвоєчасне виявлення дефектів ізоляції листів, їх подальший розвиток може привести до серйозних пошкоджень осердя, до "пожежі в сталі", до руйнування ізоляції обмотки статора і до аварійного відключення ТГ. Основною причиною таких пошкоджень є посилення вібрації. Запобіганням від вібраційних процесів можна вважати належним чином встановлену систему підвіски осердя статора до корпусу ТГ.

Система підвіски статора являє собою комплекс елементів конструкції: стяжна призма, яка з одного боку приварюється до кільцевих ребер корпусу, а з іншого пов'язана зі спинкою осердя;

- кільцеві ребра жорсткості, між якими розміщені аксіальні ребра;
- пружні пластини-підвіски і елементи конструкції, до яких кріпляться ці підвіски.

Розрахункова схема вузла пружної підвіски може бути представлена у вигляді системи стрижнів прямокутного перерізу з розподіленою масою. У загальному випадку вільні вигинні коливання стрижня з розподіленими параметрами описуються диференціальним рівнянням виду:

$$EJ \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = M; \quad \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = q,$$

де  $EJ$  - жорсткість при згині;  $y = y(x, t)$  - прогин стрижня;  $M = M(x, t)$  - згинальний момент;  $x$  - координата розглянутого перетину стрижня;  $t$  - час;  $q$  - інтенсивність розподіленого навантаження (сила інерції). Тоді

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \cdot \left( EJ \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = q. \quad (1)$$

При розгляді вільних коливань для пружного стрижня розподілена сила інерції може бути представлена:

$$q = -m_{rm} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}.$$

де  $m_{rm}$  - маса одного погонного метра стрижня. Тоді рівняння (1) можна записати

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EJ \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + m_{rm} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (2)$$

Оскільки перетин розглянутого стрижня постійне, тобто  $EJ = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ , то рівняння (2) можна спростити:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{EJ}{m_{rm}} \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0. \quad (3)$$

Будемо шукати рішення рівняння (3) за методом Фур'є. Позначимо  $u = X(x) \cdot T(t)$ .

Припустимо, що переміщення  $u$  можна представити у вигляді добутку двох функцій, одна з яких залежить тільки від аргументу  $x$ , а інша - тільки від аргументу  $t$ . Тоді замість пошуку однієї функції двох змінних  $u = f(x, t)$  необхідно визначити дві функції  $X(x)$  і  $T(t)$ . Тоді рівняння (3) можна представити:

$$-\frac{EJ}{m_{rm}} \cdot \frac{\partial^4 X}{\partial x^4} \cdot \frac{1}{X} = \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \cdot \frac{1}{T}. \quad (4)$$

Тепер ліва частина залежить тільки від  $x$ , а права - тільки від  $t$ .

Введемо постійну  $-\omega^2$ . Тоді рівняння (4) можна записати:

$$-\frac{EJ}{m_{rm}} \cdot \frac{\partial^4 X}{\partial x^4} \cdot \frac{1}{X} = -\omega^2; \quad \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \cdot \frac{1}{T} = -\omega^2.$$

або

$$\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} - \frac{m_{rm} \cdot \omega^2}{EJ} \cdot X = 0; \quad \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \omega^2 \cdot T = 0.$$

Друге рівняння показує, що рух стрижня має коливальний характер з частотою  $\omega$ . Перше рівняння

визначає форму коливань. Його рішення має чотири постійних і може бути записано:

$$X = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 \operatorname{sh} kx + C_4 \operatorname{ch} kx, \quad (5)$$

де коефіцієнт  $k$

$$k = 4 \sqrt{\frac{m_{rm} \cdot \omega^2}{EJ}}.$$

Рівняння показують, що робочий процес осердя статора має коливальний характер, а введений нами параметр  $\omega$  має сенс частоти вільних коливань.

Вимірювання вібрацій осердь ТГ на випробувальному стенді заводу і експлуатаційні дані, отримані на електростанціях, показують, що в них містяться значні осьові вібрації з подвійною частотою (100 Гц), розмах яких іноді становить до 50% розмаху радіальних вібрацій. До появи аксіальної вібрації осердь призводять тривимірні деформації, викликані механічними впливами, дією магнітних сил в осерді і магнітних полів в лобових частинах обмоток статора і ротора, явищем магнітостричкції (в основному, анізотропної), [5].

Вага лобових частин обмотки статора становить не більше 5% від ваги активної сталі, тому його впливом в розрахунках нехтуємо, що підтверджує можливість представити осердя у вигляді прямолінійного однорідного стрижня (рис. 1).

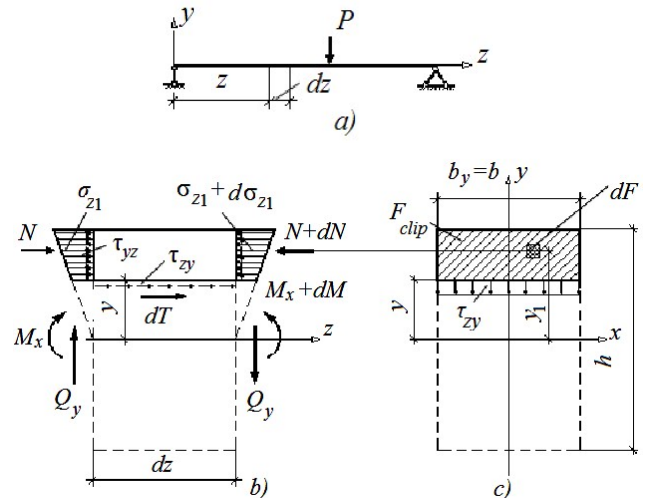


Рисунок 1 - Схема розрахунку дотичних напружень при вигині бруса - осердя

Осердя статора набирається з електротехнічної сталі, у якого модуль поздовжньої пружності (модуль Юнга),  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа. Пакети осердя розділені вентиляційними розпірками, площа яких приблизно в 6 разів менше, ніж площа поперечного перерізу осердя. Тоді в ТГ, в яких використовується газове охолодження (водень, повітря), ефективний модуль поздовжньої пружності дорівнює  $E_{long} = 10^2$  МПа, [5]. Значення власної частоти поздовжніх коливань може бути розраховане:

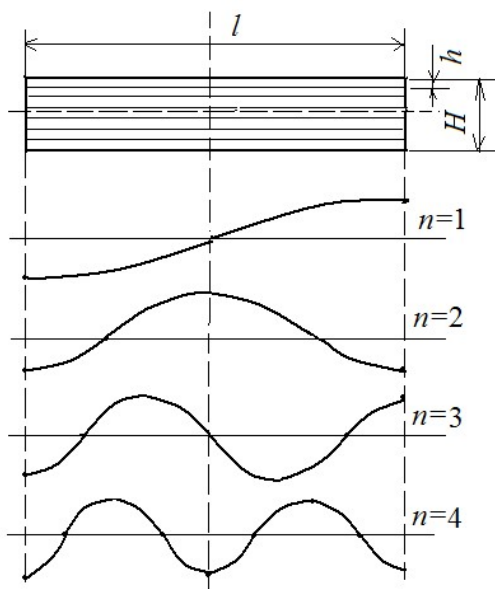


Рисунок 2 - Форми власних поздовжніх коливань стрижня

$$f_{long} = \frac{n}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E_{long}}{\rho}}, \text{ Гц}, \quad (6)$$

де  $l$  - довжина стрижня, м;  
 $\rho$  - щільність сталі, кг/м<sup>3</sup>;  
 $n = 1, 2, 3 \dots$  - порядковий номер власної частоти, що відповідає числу цілих півхвиль по довжині коливань стрижня, рис. 2.

Використовуючи (6), виконаємо розрахунки власної частоти ( $n$ ) подовжніх коливань осердя для турбогенератора ТГВ-350-2, табл. 1. Довжина активної сталі осердя (з урахуванням коефіцієнта заповнення статтю  $k_{st}=0,95$ )  $l = 5,8$  м [5].

Можна відзначити залежність значень власних частот від модуля поздовжньої пружності, який для ТГ одного і того ж виконання має розкид через значні рівні пресування, що ускладнює відокремлення від резонансних явищ.

Таблиця 1 - Значення власних частот поздовжніх коливань осердя турбогенераторів ТГВ-350-2 при різних значеннях ефективного модуля поздовжньої пружності  $E_{long}$ .

| Модуль поздовжньої пружності<br>$E_{long}$ , МПа | Номер гармоніки |     |     |     |    |     |     |     |
|--|-----------------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
|  | 1               | 2   | 3   | 4   | 5  | 6   | 7   | 8   |
| $79,3 \cdot 10^3$ (Склеєний сердечник)           | 60              | 120 | 180 | 240 | -  | -   | -   | -   |
| $2 \cdot 10^5$ (сердечник без склеювання)        | 19              | 38  | 57  | 76  | 95 | 114 | 133 | 152 |

Тому доцільна установка пружинних компенсаторів під гайки стяжних ребер осердя для виключення поздовжніх коливань шихтованого осердя, [5].

**Висновки.** З представленого матеріалу можна зробити висновок, що найбільш інформативним показником, що характеризує стан ТГ, є рівень його вібрації.

Для зниження амплітуди поздовжніх коливань шихтованого осердя доцільна установка пружинних компенсаторів під гайки стяжних ребер сердечників. Склеєні сердечники ТГ мають меншу амплітуду вібрації і працюють більш надійно навіть у стані зносу.

#### Список використаних джерел

- Кузьмин В. В., Шевченко В. В., Минко А. Н. Оптимизация массогабаритных параметров неактивных частей турбогенераторов. Харьков : Монография СПДФЛ Чальцев А.В., 2012. 246 с.
- Шевченко В. В. Соотношение технического и человеческого фактора в выполнении задачи безопасного продления сроков эксплуатации энергоблоков АЭС Украины. Днепропетровск: WayScience: міжнар. електрон. наук.-практ. журнал. 2018. № 2(2). С. 114-138.
- Шевченко В. В., Строкоус А. В. Прогнозирование эксплуатационного ресурса турбогенераторов по данным вибрационного контроля. Norwegian: Norwegian Journal of development of the International Science. 2017. № 10. С. 78-83.

#### Аннотация

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ НА ИХ НАДЕЖНОСТЬ

Шевченко В. В.

*Предложено в качестве фактора, определяющего надежность энергообеспечения потребителей промышленных и аграрных предприятий, использовать надежность работы турбогенераторов электростанций*

#### Abstract

### DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF TURBOGENERATORS LONGITUDINAL OSCILLATIONS ON THEIR RELIABILITY

V. Shevchenko

*It is proposed to use the reliability of operation of turbogenerators in power plants as a factor determining the reliability of energy supply to consumers of industrial and agricultural enterprises.*