

*П.В. Корольов, к.тех.н.
В.М. Охмакевич, н.с.
Т.К. Ковбич, аспірант
(Національний авіаційний університет, Україна)*

Діагностування вхідного пристрою стаціонарної газотурбінної установки

Обґрунтовується необхідність контролю технічного стану вхідного пристрою стаціонарної газотурбінної установки. Пропонуються для реалізації три процедури діагностування вхідного пристрою: моніторинг втрат тиску гальмування повітря; контроль правильності налаштування запобіжного байпасного клапана; контроль міцності кріплення внутрішньої обшивки та елементів цього кріплення. Надаються рекомендації відносно методичного, технічного, кадрового та організаційного забезпечення цих процедур при їх реалізації системами діагностування парків одномаркових газотурбінних установок.

Технічний стан вхідних пристроїв стаціонарних газотурбінних установок, з одного боку, має суттєвий вплив на їхні функціональні характеристики та надійність та, з другого боку, є дуже залежним від дії мінливих та важко прогнозованих зовнішніх умов експлуатації. Це обумовлює доцільність реалізації по відношенню до вхідних пристроїв системами діагностування парків одномаркових газотурбінних установок певних комплексів діагностичних процедур.

До складу зазначених комплексів важливо, на наш погляд, включати наступні три процедури:

- 1) моніторинг втрат тиску гальмування повітря;
- 2) контроль правильності налаштування запобіжного байпасного клапана;
- 3) контроль міцності кріплення внутрішньої обшивки та елементів цього кріплення.

Процедура 1: моніторинг втрат тиску гальмування повітря

Метою моніторингу є визначення необхідності відновлення технічного стану фільтруючих елементів пристрою шляхом їх очищення або заміни. При цьому в якості критерія технічного стану вхідного пристрою (ВхП) використовується коефіцієнт $\xi_{\text{вхп}}^{\text{СКР}}$ втрат тиску гальмування повітря в ньому на стаціонарному стандартному контрольному режимі (СКР) функціонування ГТУ (передбачається, що для кожної марки установки СКР повинен бути призначений індивідуально певним набором значень певної групи її контрольованих параметрів функціонування).

Моніторинг базується на послідовних у часі експлуатації результатах вимірювання (i – номер вимірювання) надлишкового тиску повітря на стінці затопленого простору каналу вхідного пристрою поблизу його вихідного перерізу (перед вхідним патрубком ГТД) на стаціонарних контрольних режимах (КР) функціонування ГТУ $p_{\text{вхпзат.надл.і}}^{\text{КР}}$. Ця величина приблизно дорівнює надлишковому тиску гальмування потоку у вихідному перерізі

вхідного пристрою: $p_{\text{вхПзат.надл.}}^{\text{КР}} \approx p_{\text{вхПнадл.}}^{\text{КР}}$. Її доцільно вимірювати водяним манометром, з'єднаним з дренажним «заподлицо» отвором стінки каналу вхідного пристрою.

Крім значення $p_{\text{вхПзат.надл.}}^{\text{КР}}$ в первинний інформаційний кадр моніторингу повинні входити результати вимірювання групи режимних параметрів установки. Для більшості марок ГТУ буває достатньо обмежитись групою наступних 3-х режимних параметрів: p_a та T_a – тиск та температура атмосферного повітря (зовнішні режимні параметри); Z – головний внутрішній режимний параметр.

Вибір величини Z повинен здійснюватися в залежності від конструкції певної марки ГТУ та складу її штатної системи контролю. В якості величини Z може бути обраний, наприклад, один з наступних параметрів функціонування: частоти обертання роторів низького та високого тиску; температури гальмування робочого тіла після компресора, камери згоряння та турбіни низького тиску; тиск гальмування після компресора; сумарна ступінь підвищення тиску гальмування в термодинамічному циклі.

На базі зареєстрованих значень $p_{\text{вхПзат.надл.}}^{\text{КР}}$, $p_{\text{аі}}^{\text{КР}}$, $T_{\text{аі}}^{\text{КР}}$ та $Z_i^{\text{КР}}$ розраховуються поточні (і-ві) значення критерія технічного стану $\xi_{\text{вхП}}^{\text{СКР}}$. Для цього використовується наступний алгоритм:

1. Коефіцієнт втрат тиску гальмування

$$\xi_{\text{вхП}}^{\text{КР}} = - p_{\text{вхПзат.надл.}}^{\text{КР}} / p_{\text{аі}}^{\text{КР}}.$$

2. Приведене до стандартних значень параметрів атмосферного повітря p_a^{CA} та T_a^{CA} значення параметра Z

$$Z_i^{\text{CAКР}} = Z_i^{\text{КР}} \cdot \varphi_z(p_{\text{аі}}^{\text{КР}}, T_{\text{аі}}^{\text{КР}}),$$

де $\varphi_z(\cdot)$ – функція приведення.

В якості функцій $\varphi_z(\cdot)$ можуть бути використані з достатньою точністю відомі з теорії газотурбінних установок (мається на увазі теорія, що розглядає робочі тіла як досконалі гази) залежності між фактичними та приведеними до p_a^{CA} та T_a^{CA} значеннями параметрів функціонування: якщо головним внутрішнім режимним параметром є частота обертання ротора, то

$$\varphi_z(\cdot) = (T_a^{\text{CA}} / T_{\text{аі}}^{\text{КР}})^{1/2},$$

якщо температура або температура гальмування робочого тіла, то

$$\varphi_z(\cdot) = T_a^{\text{CA}} / T_{\text{аі}}^{\text{КР}},$$

якщо тиск або тиск гальмування, то

$$\varphi_z(\cdot) = p_a^{\text{CA}} / p_{\text{аі}}^{\text{КР}},$$

якщо ступінь підвищення (зниження) температури (тиску) або температури (тиску) гальмування на певній ділянці проточної частини ГТУ, то

$$\varphi_z(\cdot) = 1.$$

В якості стандартних значень параметрів атмосферного повітря тут можна призначити, слідуючи галузевій практиці, значення, що відповідають міжнародній стандартній атмосфері на рівні моря.

3. Приведена до p_a^{CA} та T_a^{CA} масова витрата повітря установки

$$G_{\text{в}}^{\text{CAКР}} = f_{G_{\text{в}}}(Z_i^{\text{CAКР}}),$$

де $f_{G_{\text{в}}}(\cdot)$ – функція залежності $G_{\text{в}}^{\text{CAКР}}$ від $Z_i^{\text{CAКР}}$ для середньостатистичної ГТУ марки, що розглядається, відома за результатами її проектних розрахунків та/або випробувань її окремих екземплярів.

4. Поточне значення критерія технічного стану вхідного пристрою

$$\xi_{\text{вхП}}^{\text{СКР}} = \xi_{\text{вхП}}^{\text{СКР}} \cdot (\mathbf{G}_{\text{в}}^{\text{СКР}} / \mathbf{G}_{\text{в}}^{\text{САКР}})^2,$$

де $\mathbf{G}_{\text{в}}^{\text{СКР}}$ – масова витрата повітря середньостатистичної ГТУ марки, що розглядається, на стандартному контрольному режимі її функціонування, що відповідає значенням режимних параметрів p_a^{CA} , T_a^{CA} та $\mathbf{Z}^{\text{СКР}}$: $\mathbf{G}_{\text{в}}^{\text{СКР}} = f_{\text{G}}(\mathbf{Z}^{\text{СКР}})$.

Можна бачити, що вищенаведений алгоритм використовує двоступеневу процедуру приведення параметрів робочого процесу газотурбінної установки до її стандартного контрольного режиму функціонування (рис. 1). Саме такий методичний підхід покладений в основу раніше згаданої теорії газотурбінних установок.

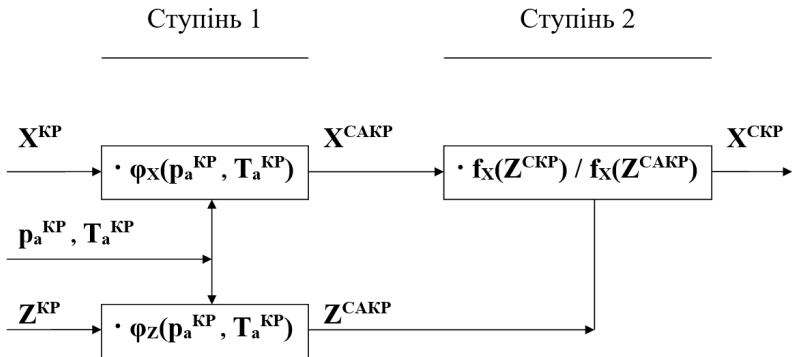


Рис. 1. Схема двоступеневої процедури приведення параметра X робочого процесу газотурбінної установки до її стандартного контрольного режиму

Двома найважливішими складовими методичного забезпечення запропонованої процедури моніторингу є наступні дві:

1) граничне значення $\xi_{\text{вхП}}^{\text{СКР}*}$ критерію технічного стану вхідного пристрою, при перевищенні якого приймається рішення про відновлення технічного стану його фільтруючих елементів;

2) алгоритм визначення моментів часу експлуатації ГТУ для чергової реалізації процедури.

Очевидно, що зазначені складові методичного забезпечення повинні призначатись для кожного з парків одномаркових ГТУ індивідуально з урахуванням особливостей їхньої конструкції, а також особливостей системи та умов їхньої експлуатації. Тут можливо висловити наступні міркування.

У стаціонарної газотурбінної установки з новими або недавно очищеними фільтруючими елементами вхідного пристрою значення критерію $\xi_{\text{вхП}}^{\text{СКР}}$ звичайно знаходиться в діапазоні 0,002...0,004. По мірі забруднення елементів це значення зростає, що беззаперечно свідчить про відповідне зменшення потужності та коефіцієнту корисної дії ГТУ. Саме наявність негативного впливу забруднення фільтрів вхідного пристрою на потужність та ККД ГТУ вимагає призначення для критерію $\xi_{\text{вхП}}^{\text{СКР}}$ граничного значення.

Найбільш точне призначення величини $\xi_{\text{вхп}}^{\text{СКР}*}$ може бути здійснене для кожної марки ГТУ кожного експлуатаційного підприємства шляхом розв'язання оптимізаційної задачі мінімізації суми втрат від зменшення потужності та ККД установки та витрат на відновлення технічного стану її вхідного пристрою. Слід очікувати, що для більшості марок стаціонарних ГТУ величина $\xi_{\text{вхп}}^{\text{СКР}*}$, отримана як результат розв'язання зазначеної оптимізаційної задачі, буде знаходитись в діапазоні 0,01...0,02.

Можна рекомендувати наступний алгоритм визначення моментів часу експлуатації газотурбінної установки для чергової реалізації процедури:

1) через кожні 24 години напрацювання при звичайних зовнішніх умовах функціонування;

2) через кожні 6 годин напрацювання при надзвичайних зовнішніх умовах функціонування: при підвищеній імовірності появи в повітрі перед вхідним пристроєм значної кількості пилу, комах, сухих листів або насіння рослин тощо;

3) після кожного запуску та перед кожною плановою зупинкою.

Процедура 2: контроль правильності налаштування запобіжного байпасного клапана

Запобіжний байпасний клапан забезпечує пряме (без фільтрації) підведення повітря до компресора газотурбінного двигуна у випадку неприпустимо великого аеродинамічного опору фільтруючих елементів вхідного пристрою. Зазначений випадок може з'явитися внаслідок перекриття каналів фільтруючих елементів снігом, льодом, пилом, комахами або рослинами, а також внаслідок їхнього механічного руйнування.

Запобіжний байпасний клапан звичайно є таким: горизонтальна заслінка, що перекриває собою отвір в нижній стінці горизонтальної ділянки каналу вхідного пристрою до тих пір, поки її вага перевищує спрямовану наверх силу, створену різницею тисків знизу (тиск атмосферного повітря p_a) та зверху (тиск повітря після фільтруючих елементів $p_{\text{ФЕ}}$) її.

Періодична процедура перевірки та відновлення правильності налаштування запобіжного байпасного клапана на спрацьовування в напрямку відкриття необхідна внаслідок його можливих пошкоджень (корозійних, механічних) та забруднень його важливого механізму. Налаштування здійснюється за допомогою набору еталонних ваг, що можуть в різних сполученнях прикріплюватися до заслінки.

Можна рекомендувати наступні значення параметрів процедури: періодичність виконання – не рідше 2-х разів на календарний рік; запобіжний байпасний клапан повинен бути відкритим при $p_a - p_{\text{ФЕ}} > 0,005$ МПа.

Процедура 3: контроль міцності кріплення внутрішньої обшивки та елементів цього кріплення

Листи внутрішньої обшивки вхідного пристрою кріпляться до його каркасу або зварюванням, або за допомогою різьбових кріпильних елементів.

На ці листи під час роботи газотурбінної установки діють відривні сили, бо тиск повітря на стінках каналу пристрою буває меншим, ніж тиск атмосферного повітря. Питомі значення цих сил можуть досягати 500 кгс/м².

Таким чином, існує небезпека часткових або повних відривів листів внутрішньої обшивки пристрою від каркасу. Появі відривів сприяє наявність в каналі пристрою потоку повітря, швидкість якого в деяких зонах може досягати 100 м/с.

Можливі наступні шкідливі наслідки відривів обшивки:

1. Попадання конструктивних елементів обшивки (листи, обривки листів, елементи кріплення) на вхід компресора ГТД з пошкодженням його лопаток.

2. Збільшення втрат тиску гальмування повітря у вхідному пристрої з причини появи локальних перешкод на шляху потоку до двигуна (відставання краю листа від каркасу, зупинення листа або його обривку на решітці профілів вхідного направляючого апарату компресора ГТД тощо).

3. Поява радіальної та колової нерівномірності потоку повітря на вході в компресор ГТД.

Внаслідок вищезазначеного й виникає необхідність реалізувати при експлуатації ГТУ процедуру контролю, що розглядається.

Така процедура повинна мати наступні 2 складові:

1) спостереження за обшивкою при функціонування ГТУ;

2) обстеження обшивки при технічному обслуговуванні зупиненої ГТУ.

Перша складова процедури повинна виконуватися черговими працівниками підрозділу оперативного технічного обслуговування обладнання експлуатаційного підприємства.

Спостереження здійснюється через спеціальні віконця в стінках вхідного пристрою з використанням стаціонарних або переносних освітлювальних пристроїв. Період спостереження не повинен бути більшим, ніж 12 годин напрацювання газотурбінної установки. Мета спостереження - виявлення наступних дефектів:

1) відсутність листів обшивки або їхніх частин;

2) відсутність елементів кріплення листів обшивки;

3) ознаки початку відриву листів обшивки від каркасу (відставання, загинання, коливання,...).

Друга складова процедури повинна виконуватися працівниками підрозділу періодичного технічного обслуговування обладнання експлуатаційного підприємства.

Обстеження здійснюється шляхом зовнішнього огляду листів обшивки та перевірки правильності та міцності їхнього кріплення за допомогою спеціальних слюсарних інструментів. Період спостереження не повинен бути більшим, ніж 6 календарних місяців. Мета спостереження - виявлення наступних дефектів:

1) відсутність листів обшивки або їхніх частин, ознаки процесів їхнього руйнування (тріщини, корозійні пошкодження тощо);

2) відсутність елементів кріплення листів обшивки або їхніх частин, ознаки процесів їхнього руйнування;

3) ознаки початку відриву листів обшивки від каркасу (відставання, загинання, ослаблення кріплень,...).

Процедура контролю, що розглядається, повинна виконуватись з урахуванням можливості існування в каналах входних пристроїв ГТУ зон підвищеної небезпеки відриву листів внутрішньої обшивки. Для таких зон процедура повинна передбачати більш ретельне обстеження об'єкта.

Існування зон підвищеної небезпеки відриву листів обшивки притаманно перш за все для криволінійних каналів входних пристроїв. В таких пристроях зазначені зони виникають поблизу поздовжніх опуклостей стінок, де тиск (статичний) в потоці повітря p локально зменшується, а швидкість цього потоку c зростає (при цьому $dp \approx -\rho c dc$, де ρ - щільність повітря, $\rho \approx \rho_a$). Кожна з цих 2-х змін призводить до підвищення небезпеки відриву листів обшивки, бо посилюється дія наступних 2-х факторів:

- 1) відривного перепаду тисків на обшивці ($d(p_a - p) \approx \rho c dc$);
- 2) відгинаючої та зносячої аеродинамічної сили $F_{Вз}$, що діє на лист обшивки, який почав відділятися від каркасу ($dF_{Вз} = k \rho c dc S_m$, де $k \approx 1$ – коефіцієнт аеродинамічного опору; S_m – міделева площа листа, який почав відділятися).

Найбільш обґрунтовано зони підвищеної небезпеки відриву листів обшивки можуть бути виявлені шляхом математичного моделювання руху повітря в каналі входного пристрою за допомогою, наприклад, відомого програмного комплексу Ansys.