УДК 621.165.52

doi: 10.20998/2078-774X.2024.02.06

І. М. БАБАЄВ

РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІМПУЛЬСНИХ ЛІНІЙ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ПАРОВИХ ТУРБІН З ЕЛЕКТРОННИМ АВТОМАТОМ БЕЗПЕКИ

У статті розглядаються недоліки і переваги використання механічного та електронного автомату безпеки в системі захисту парових турбін від неприпустимого розгону. Дається обґрунтування використання електронного автомату безпеки для підвищення надійності систем захисту. Проведено розрахунковий аналіз динаміки роботи двох типів схем підключення виконавчих золотників електронного автомату безпеки до імпульсної лінії системи захисту. В першій схемі виконавчі золотники включено паралельно захисним пристроям. Живлення імпульсної лінії захисту виконується через дросельну шайбу. Виконавчі золотники і захисті пристрої здійснюють злив з імпульсної лінії. У другій – виконавчі золотники включено послідовно захисним пристроям. У цій схемі виконавчі золотники здійснють одночасне керування підведенням та зливом робочої рідини з імпульсної лінії захисту. Для кожної схеми розроблено математичні моделі, які представляють собою системи нелінійних диференціальних і алгебраїчних рівняь. Розрахунок проводився для випадку спрацювання захисту парової турбіни ПТ-25-90/10 яка має електрогідравлічну систему регулювання. Результатами розрахунків показано, що виконавчих золотникив електронного автомату безпеки послідовно захисним пристроям дозволяє отримати більшу швидкодію скидання тиску в імпульсній лінії захисту. Дається висновок, що динаміку процесу в значній мірі визначає кількість пружинних вимикачів виконавчих сервомоторів, що включено в імпульсну лінію захисту. Отримані результати можуть бути використані для модернізації систем автоматичного регулювання та захисту парових турбін шляхом впровадження електронного автомата безпеки.

Ключові слова: парова турбіна, система захисту, золотник, електронний автомат безпеки, регулятор безпеки, захисний пристрій.

I. BABAYEV CALCULATION ANALYSIS OF DYNAMIC PROPERTIES OF IMPULSE LINES OF STEAM TURBINE PROTECTION SYSTEM WITH ELECTRONIC SAFETY GOVERNOR

The article examines the advantages and disadvantages of the failure of the mechanical and electronic safety governors in the protection systems steam turbines from unacceptable overclocking. The justification for using an electronic safety circuit breaker to increase the reliability of protection systems is given. A computational analysis of the dynamics of the operation of two types of schemes for connecting the valves of the electronic safety governor to the impulse line of the protection system has been carried out. In the first scheme, the valves is connected in parallel with the protective devices. The pulse protection line is powered through a choke washer. The valves of the electronic safety governor and protective devices. In this scheme, the devise of the electronic safety governor simultaneously controls the supply and drain of working fluid from the impulse protection line. For each scheme, mathematical models have been developed, which represent systems of nonlinear differential and algebraic equations. The calculation was carried out for the case of protection tripping of the PT-25-90/10 steam turbine, which has an electro-hydraulic control system. The results of the calculations show that installing the valves of the electronic safety governor in series with the protective devices allows to have the higher pressure relief speed in the impulse protection line. It is concluded that the dynamics of the process is largely determined by the number of spring switches of the servomotors included in the impulse protection line. The results obtained can be used to modernize protection systems of steam turbines by introducing an electronic safety governor.

Key words: steam turbine, protection system, valve, electronic safety governor, safety governor, protective device.

Вступ

Більшість парових турбін, що знаходяться в експлуатації, мають системи захисту із механічними регуляторами безпеки. Введення зовнішніх команд від стійок захисту здійснюється через золотники або клапани в яких електромагніти використовуються як приводи. Для перетворення команд регуляторів безпеки під час спрацьовування використовуються виконавчі золотники. Більшість виконавчих золотників та золотників захисту дублюються, що утворює два незалежні канали. Спрацювання будь-якого каналу призводить до зупинки турбіни. Виконавчі золотники та золотники захисту діють на імпульсну лінію захисту, яка виконує функцію підсумовування та передачі командних імпульсів на вимикачі. Вимикачі керують сервомоторами стопорних та відсікаючих клапанів або заслінок.

Використання механічних регуляторів безпе-

ки має низку переваг:

1) Механічні регулятори безпеки прості та надійні. Це підтверджено вдалим досвідом багаторічної експлуатації;

2) Вони дозволяють зберегти працездатність системи захисту парової турбіни від підвищення частоти обертання при втраті електричного живлення, що може мати місце в аварійних режимах роботи;

3) Забезпечується максимальна швидкодія системи захисту. Запізнення передачі командного імпульсу мінімально. Це зменшує величину підвищення частоти обертання ротора турбіна при спрацьовуванні захисту.

Недоліками використання механічних регуляторів безпеки є:

1) Необхідність проведення періодичних випробувань усієї лінії захисту. Тривале знаходження механічних регуляторів безпеки, виконавчих золотників, блоків золотників захисту, стопорних

© І. М. Бабаєв, 2024

та відсікаючих клапанів, заслінок у взведенному стані не гарантує збереження їхньої працездатності. Тільки безпосереднє спрацьовування всієї лінії захисту з усіма механізмами є загальноприйнятим показником працездатності системи захисту парової турбіни. Це визначає необхідність відключення турбіни від мережі та її зупинки.

2) Дублювання регуляторів безпеки дозволяє забезпечити перевірку одного з каналів захисту під час знаходження другого каналу в роботі. Однак дублювання золотників захисту не дозволяє проводити їх випробування без зупинки турбіни, тому що спрацювання захисту відбувається при спрацюванні будь якого золотника. Встановлення додаткових пристроїв, які вимикають один золотник захисту під час випробування, може призвести до відмови всього захисту із загальної причини – відмови додаткового пристрою.

Загальною тенденцією вдосконалення систем

автоматичного регулювання та захисту є використання електронних керуючих пристроїв. У частині системи захисту широко впроваджуються електронні автомати безпеки (ЕАБ). Принципи побудови та вимоги до елементів наведено у стандартах АРІ-670 [1], АРІ-612 [2]. Відповідно до цього стандарту ЕАБ виконується трьохканальним і побудованим за принципом роботи «два із трьох», тобто. захист спрацьовує тільки у разі одночасного спрацьовування не менше двох каналів у будьякому сполученні. Це дозволяє перевіряти канали ЕАБ всіх сталих режимах роботи турбіни.

Важливим питанням, що визначає величину закидання частоти обертання ротора турбіни, є динаміка падіння тиску в лінії захисту. Вона залежить від схеми, за якою побудована ця лінія.

Відомі дві основні схеми включення пристроїв до лінії захисту (див. рис. 1).









На рис. 1*а* представлена схема, побудована за принципом «зливу». У цій схемі підживлення лінії захисту виконується через шайбу дросельну, а всі виконавчі золотники здійснюють злив з цієї лінії. Перевагою запропонованих технічних рішень і те, що конструкція виконавчих механізмів спрощена. Недоліки схеми в тому, що потрібні додаткові роботи з її налагодження, а також у тому, що при спрацьовуванні захисту потрібна витрата робочої рідини в системі підвищується. Подібні схеми широко застосовуються на парових турбінах великої потужності ТЕС та АЕС [3] – [6].

На рис. 1 δ представлена схема, де кожен механізм одночасно керує, як підживленням, так і зливом з цієї лінії. Перевагою схеми є відсутність необхідності додаткового налагодження, а також зниження потрібних витрат робочої рідини при спрацьовуванні захисту. Недоліком є ускладнення конструкції виконавчих механізмів. Схема по рис.16 широко застосовується у парових турбінах малої потужності таких як OK-12A, ПТ-25-90/10 та інші.

Мета роботи

Метою даної роботи є визначення швидкодії ліній захисту в обох згаданих схемах для вироблення рекомендацій щодо вибору побудови ліній захисту при впровадженні електронних автоматів безпеки.

Математичні моделі що використовуються для розрахункового аналізу

Оцінка динаміки роботи обох схем проводилася розрахунковим методом. За основу взято електрогідравлічну систему автоматичного регулювання та захисту турбіни ПТ-25-90/10 де в лінію захисту включено три вимикачі вбудовані у відсічні золотники сервомоторів регулюючих клапанів, приводів виробничого та теплофікаційного відборів. Принципова схема системи представлена на рис. 2.

Розрахунковий аналіз проводився з урахуванням математичних моделей, що представляють собою системи нелінійних диференціальних і звичайних рівнянь. Вони представлені нижче за текстом.

Система рівнянь (1) складена для схеми рис. 1*a*, система рівнянь (2) – для схеми по рис. 1*б*.

$$Q_{dp}(t) = \mu F_{dr} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_0 - p_1(t))},$$

$$x_{bz}(t) = \begin{vmatrix} 0; & t \le t_d \\ \frac{x_{bz \max}}{t_{bz \max}} (t - t_d); & t_d < t \le t_{bz \max}, \\ \frac{x_{bz \max}}{x_{bz \max}}; & t > t_{bz \max}, \end{vmatrix}$$

$$Q_{bz}^{out}(t) = \mu F_{bc}(t) \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1(t) - p_{sl})},$$

$$\frac{dx_z(t)}{dt} = \frac{Q_{bz}^{out}(t) - Q_{dp}(t)}{S_z}, \qquad (1)$$

$$p_{1}(t) = \begin{vmatrix} p_{0}; & x_{bz}(t) \le x_{bzp} \\ \frac{p_{0}F_{dr}^{2} + p_{sl}F_{bz}^{2}(t)}{F_{dr}^{2} + F_{bz}^{2}(t)}; & \frac{dx_{z}(t)}{dt} \le 0 \\ p_{z1} - \frac{p_{z1} - p_{z2}}{x_{z \max}} x_{z}(t) \\ F_{bz}(t) = \frac{F_{bz \max}}{x_{bz \max}} x_{bz}(t), \end{vmatrix}$$

$$Q_{bz}^{en}(t) = \mu(F_{bz\,\max} - F_{bz}(t)) \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_0 - p_1(t)),$$

$$x_{bz}(t) = \begin{vmatrix} 0; & t \le t_d \\ x_{bz\,\max} & (t - t_d); & t_d < t \le t_{bz\,\max}, \\ t_{bz\,\max} & x_{bz\,\max}; & t > t_{bz\,\max}, \\ x_{bz}\,\max; & t > t_{bz\,\max}, \\ Q_{bz}^{out}(t) = \mu F_{bc}(t) \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_1(t) - p_{sl}), \\ \frac{dx_z(t)}{dt} = \frac{Q_{bz}^{out}(t) - Q_{bz}^{en}(t)}{S_z}, \end{cases}$$
(2)

$$p_{1}(t) = \begin{vmatrix} p_{0}; & x_{bz}(t) \leq x_{bzp} \\ p_{0}(F_{bz \max} - F_{bz}(t))^{2} + p_{sl}F_{bz}^{2}(t); & \frac{dx_{z}(t)}{dt} \leq 0 \\ F_{bz \max} - F_{bz}(t)^{2} + F_{bz}^{2}(t); & \frac{dx_{z}(t)}{dt} \leq 0 \\ p_{z1} - \frac{p_{z1} - p_{z2}}{x_{z \max}} x_{z}(t) \\ F_{bz}(t) = \frac{F_{bz \max}}{x_{bz \max}} x_{bz}(t), \end{vmatrix}$$

де t-час;

T

 t_d – час запізнення на початку руху золотників ЕАБ;

 $t_{bz \max}$ – час переміщення золотника ЕАБ на повний хід;

µ – коефіцієнт витрати;

ρ – густина робочої рідини;

 $F_{bz}(t)$ – зміна площі відкриття вікна на злив золотників ЕАБ;

 F_{bzmax} — максимальна площа вікна на злив золотників ЕАБ;



сервомотора, сервомоторів виробничого та теплофікаційного відборів



Рис. 3 – Динаміка роботи захисту під час подачі команди на електромагніти золотників ЕАБ: *а* – для схеми рис. 1*а*; *б* – для схеми рис. 1*б*

F_{dr} – прохідна площа дроселя підживлення лінії захисту;

 S_z – площа торця золотника вимикача головного сервомотора, сервомоторів виробничого і технологічного відборів;

*p*₀ – тиск робочої рідини в імпульсній лінії захисту у взведеному стані;

*p*_{*sl*} – тиск у колекторі зливу;

 $p_1(t)$ – тиск у лінії захисту;

 p_{z1} – тиск під золотником вимикача при його знаходженні у зведеному стані;

*p*_{z2} – тиск під золотником вимикача при його підході у вибитому стані;

 $Q_{dp}(t)$ – витрата робочої рідини через дросель підживлення лінії захисту; $Q_{bz}^{out}(t)$ – витрата робочої рідини через вікна зливу золотників;

 $Q_{bz}^{en}(t)$ – витрата робочої рідини в лінію захисту через вікна золотника ЕАБ;

 $x_z(t)$ - хід золотників вимикачів головного сервомотора, сервомоторів виробничого і технологічного відборів;

x_{zmax} - максимальний хід золотника вимикача
 сервомотора стопорного клапана;

 $x_{bz}(t)$ - хід золотника електронного автомату безпеки;

 x_{bzp} - хід золотника електронного автомату безпеки до початку відкриття вікна на злив;

*x*_{*bz*max} - максимальний хід золотника електронного автомату безпеки.

Вихідні дані та передумови до розрахунку, отримані результати

У розрахунку приймалося, що розміри ВЗ ГСМ, ВЗ СМ ВВ та ВЗ СМ ТВ однакові. Інші розміри приймалися за даними результатів налагодження.

Для вирішення використовували метод Рунге-Кутта четвертого ступеня.

Результати розрахунків наведено на рис. 3. На рис. 3 змінні означають:

 $\overline{x}_{bz} = \frac{x_{bz}}{x_{bz \max}}$ – безрозмірна величина перемі-щення золотника ЕАБ;

 $\bar{x}_z = \frac{x_z}{x_{z \max}}$ – безрозмірна величина перемі-

щення золотника ВЗ;

 $\overline{p}_1 = \frac{p_1}{p_1}$ – безрозмірна величина тиску в лінії

захисту.

Аналіз отриманих результатів

Отримані результати свідчать про незначну перевагу в швидкодії лінії захисту, яка побудована за схемою на рис 1б). Основною причиною отриманого висновку є те, що загальну витрату лінії захисту на злив визначає динаміка виштовхування об'єму робочої рідини з пружинних порожнин вимикачів. Порівняно з цим, підживлення лінії захисту через дросельну шайбу впливає значно менше. Тому вибір тієї чи іншої схеми побудови лінії захисту може виконуватись розробником системи автоматичного регулювання та захисту, виходячи з наявного досвіду, мінімізації робіт під час модернізації чи з інших причин. При виборі типу вимикачів слід віддавати перевагу мембранним беззолотниковим [4], [5]. При їх спрацьовуванні частина робочої рідини виштовхується в щілину між мембраною та корпусом. Це зменшує витрати робочої рідини на злив через виконавчий механізм чим збільшує швидкодію системи.

Висновки

1 Обидві розглянуті схеми побудови імпульсних ліній захисту незначно різняться між собою швидкодією.

2 Вибір схеми побудови імпульсних ліній захисту можна вибирати з урахуванням інших критеріїв.

Список літератури

- 1. API STD 670 (R2022) Machinery Protection Systems / American Petroleum Institute (API). - 5th Ed. - 2014. - 244 p. -URL: https://www.standardssupply.com/product/API-Std-670-R2022/ (дата звернення 27.11.2024).
- API STD 612 Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries - Steam Turbines - Special-purpose Applications / American Petroleum Institute (API). - 8th Ed. - 2020. - 199 p. -URL: https://www.standardssupply.com/product/API-Std-612/ (дата звернення 27.11.2024).
- 3. Швецов В. Л. Результати впровадження електрогідравлічних систем регулювання на турбінах К-220-44 АЕС / В. Л. Швецов, І. М. Бабаєв // Енергетика та електрифікація. 2020. – № 3–4. – C. 2–15. – ISSN 0424-9879.
- 4. Швецов В. Л. Система автоматичного регулювання та захисту парової турбіни К-220-12,8 ПАТ «Турбоатом» для ТЕС / В. Л. Швецов, І. М. Бабаєв // Енергетика та електрифікація. - 2016. - № 8. - С. 29-35. - ISSN 0424-9879.
- 5 Babayev I. Technical Solutions for 240 Mw Steam Turbines / I. Babayev // Electrical India. - 2023. - PP. 36-39. - URL: https://www.researchgate.net/publication/375957097_Technical Solutions_for_240_Mw_Steam_Turbines (дата звернення 27.11.2024).
- 6. Babayev I. Conceptual justification for the selection of electrohydraulic control systems for steam turbines using electromechanical converters / I. Babayev // SCIREA Journal of Energy. 2023. - Vol. 8, No. 1. - PP. 1-17. - ISSN 2995-7737. - DOI: https://doi.org/10.54647/energy480177.

References (transliterated)

- 1. American Petroleum Institute (API) (2014), API STD 670 (R2022) Machinery Protection Systems, 5th Ed, 244 p, Access mode: https://www.standardssupply.com/product/API-Std-670-R2022/ (accessed 27 November 2024).
- American Petroleum Institute (API) (2020), API STD 612 Pe-2. troleum, Petrochemical and Natural Gas Industries - Steam Turbines - Special-purpose Applications, 8th Ed, 199 p, Access mode: https://www.standardssupply.com/product/API-Std-612/ (accessed 27 November 2024).
- Shvetsov V. L, Babayev I. (2020), "Rezul'taty vprovadzhennja 3. elektrogidravlichnyh system reguljuvannja na turbinah K-220-44 AES", Energetyka ta elektryfikacija, no. 3-4, pp. 2-15, ISSN 0424-9879.
- Shvetsov V. L, Babayev I. (2016), "Systema avtomatychnogo 4 reguljuvannja ta zahystu parovoi' turbiny K-220-12,8 PAT «Turboatom» dlja TES", Energetyka ta elektryfikacija, no. 8, pp. 29–35, ISSN 0424-9879.
- 5. Babayev I. (2023), "Technical Solutions for 240 Mw Steam Turbines", Electrical India, P. 36-39, Access mode: https://www.researchgate.net/publication/375957097_Technical _Solutions_for_240_Mw_Steam_Turbines (accessed 27 November 2024).
- Babayev I. (2023), "Conceptual justification for the selection of 6. electro-hydraulic control systems for steam turbines using electromechanical converters", SCIREA Journal of Energy, vol. 8, no. 1, pp. 1–17, https://doi.org/10.54647/energy480177. ISSN 2995-7737,

Надійшла (received) 11.10.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Бабаєв Іван Миколайович (Babayev Ivan) – кандидат технічних наук, начальник відділу систем регулювання парових турбін Акціонерне товариство «Українські енергетичні машини»; Ivan021262@gmail.com, тел. 066-30-26-929.