

В.В. Радченко, канд. техн. наук
(Україна, Запорізька державна інженерна академія)

ГІДРОЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА РОБОЧА СКЛАДОВА ГІДРОАГРЕГАТУ ГЕС

Гідроелектродинаміка, як науковий напрям поліпредметного підходу до енергодинаміки, має суттєве значення в розгляді сучасних робочих особливостей енергетичних перетворювачів ГЕС, визначає її напрями й практичні додатки. Актуальність даного підходу підкреслюється визначеною системною роллю гідроенергетики як мобільного резерву енергетичної системи та невпинно зростаючою статистикою кількості робочих циклів енергетичного обладнання. Однак безпосереднім витокком її слід вважати саме відповідні властивості технологічної схеми гідроенергетичного перетворення, та її аналіз на основі розробленого МЕІ підходу [1, 2].

Енергодинаміка в цілому відображає енергетичні складові та їх вплив відносно окремих компонентів технологічної системи енергетичних перетворень. Загальна схема енергетичного процесу гідроагрегату як базового елемента ГЕС така:

$$Г \rightarrow М \rightarrow Е$$

де відповідно складові: **Г** – гідравлічна, **М** – механічна, **Е** – електрична.

Саме зазначена схема наочно свідчить про необхідність такого підходу до аналізу зазначеного технологічного процесу. Розгляд технологічної схеми гідроагрегату практично доводить триєдність взаємопов'язаних складових єдиного енергетичного процесу: гідравлічної, механічної й електричної, рис. 1.

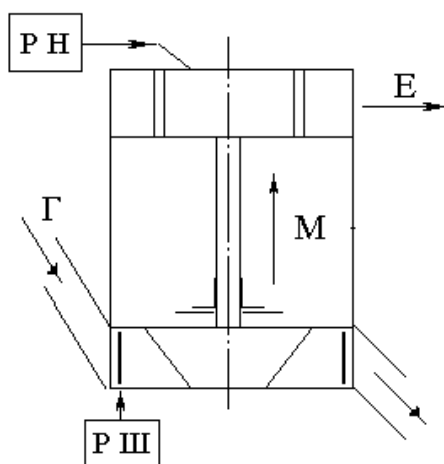


Рис. 1. Технологічна схема гідроагрегату

У даному випадку, з погляду адекватного спрощення, може розглядатися енергодинаміка двох складових – гідромеханічної й електромеханічної, а також їх можливі взаємодії.

При цьому організована й узгоджена взаємодія складових з погляду різноплановості їх природи не тільки містить у собі резерви, але й здатна забезпечити нові якості існуючих технічних систем.

На наведеній технологічній схемі гідравлічна (**Г**) складова енергії перетворюється в проміжну механічну складову (**М**) й тільки потім – в електричну (**Е**). Оскільки ця схема на практиці реалізується різними функціональними елементами гідроагрегату, то доцільно розглянути динамічні властивості її основних елементів.

Схема перетворення $Г \rightarrow М$ реалізується гідравлічною турбіною за відповідних характеристик потоку, що переважно забезпечуються гідроспорадами. Схема $М \rightarrow Е$ реалізується гідрогенератором за умови потрібних характеристик якості, що забезпечуються системою збудження.

Для визначених систем можливо розглянути вплив окремих важливих дійсних чинників.

Динамічний чинник — визначається різницею сили тяги й сили опору, віднесених до маси механізму.

$$D = (P_T - P_C) / G,$$

де P_T, P_c, G — відповідно сила тяги, сила опору й маса механізму.

Динаміка електромеханічних пристроїв відповідно визначається їх електричними й механічними динамічними властивостями.

Динаміка гідромеханічна визначається гідродинамікою і інерційними властивостями гідромеханічного обладнання.

Гідроелектродінаміка дозволяє практично об'єднати вказані компоненти на їх гідромеханічній та електромеханічній основах, тобто, на рівні польовому.

Енергетичні співвідношення і впливи на польовому рівні, зокрема електромагнітного поля визначаються теоремою Умова – Пойнтінга, [3]. Для цього переважно використовують векторний добуток складових електромагнітного поля у вигляді вектора Пойнтіга

$$\vec{\Pi} = [\vec{E} \cdot \vec{H}]$$

Вказаний вектор, як відомо, маючи розмірність потужності, віднесеної до одиниці поверхні ($\text{ВА}/\text{м}^2$), обертаючись навколо своєї осі, вказує напрям потоку енергії, рис. 2.

Потік вектора Пойнтінга для миттєвих значень величин згідно із зазначеною теоремою має вигляд

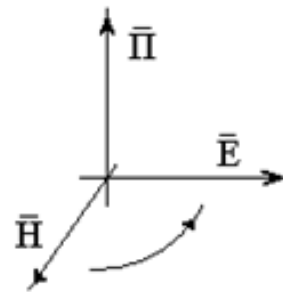


Рис. 2. Вектор енергії електромагнітного поля

$$-\oint_S \vec{\Pi} \cdot d\vec{S} = \int_V \gamma \cdot E^2 \cdot dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV$$

Наведене співвідношення справедливе з урахуванням припущення, що середовище об'єму V однорідне й ізотропне, а також за відсутності відображень, хвиль і джерел ЕРС усередині об'єму.

Вказаний потік, спрямований всередину об'єму крізь замкнену поверхню S , що обмежує об'єм V , практично реалізує механізми енергоінформаційного обміну.

По суті теорема Умова – Пойнтінга відображає поточний енергетичний баланс системи або елемента системи. Ліва частина рівняння – це потужність потоку особисто вектора Пойнтінга, а права – енергія, що витрачається всередині об'єму. Причому перший додатак правої частини відображає теплову енергію, а другий – приріст або швидкість зміни запасу електромагнітної енергії об'єму.

Слід зазначити, що наведене інтегральне рівняння відображає також і механізм проходження потоку енергії через об'єм простору V . Цей шлях проходить в діелектричному середовищі. Електромагнітна енергія від місця її генерування передається до місця її перетворень по діелектрику. При цьому провідники ліній передач за рахунок проходження струму виконують своєрідну двояку роль: формують енергетичні канали і фактично структурують поле.

Важливо при цьому враховувати також й існуючі можливості підходів аналогій. Слід зазначити, що принципово сама фізична природа електричних і гідравлічних явищ може розглядатися за двома рівнями:

- корпускулярним (молекулярним), тобто у вигляді потоку частинок;
- хвильовим, у вигляді полів, що мають досить різні прояви в електроенергетиці і гідроенергетиці.

При молекулярному підході за одиницю електричної енергії приймають 1 МеВ, при хвильовому – 1 кВт·г. Їх співвідношення таке:

$$1 \text{ МеВ} = 4,42 \cdot 10^{-20} \text{ кВт} \cdot \text{г.}$$

Співвідношення цих величин підкреслює, що енергетичні задачі можуть розглядатися не тільки в молекулярному, але і в хвильовому аспекті. У той же час матеріальний підхід ближче до молекулярного. Передача електроенергії переважно розглядається в хвильовому аспекті. При цьому існують й відмінності передачі електричної й гідравлічної енергетичних складових. Лінія електропередач фактично не транспортує електрику, як наприклад, водоводи транспортують воду. Вона є своєрідним хвилеводом з направляючими у вигляді провідників, які примушують енергію проходити певним шляхом. Такий хвилевід є найбільш простим засобом передачі енергії при хвилях малої довжини. Саме на цих властивостях засновані підходи до створення однопровідних ліній електропередач, в яких переріз провідника переважно визначається умовами механічної міцності, а не електропровідності, оскільки він служить тільки направляючою основою потоку енергії.

Однак при існуючих відмінностях є й досить суттєві співпадіння опису енергетичних складових явищ гідравлічних й електричних. Цьому багато в чому сприяють гідроелектромеханічні аналогії, що пов'язують між собою основні компоненти різних систем. Вони ґрунтуються на тому, що існують

цілком певні аналогії між гідравлічними, механічними та електричними процесами й величинами, що описують дію гідроенергетичної системи, таблиця 1.

Таблиця 1

Системи гідроелектромеханічних аналогій

Гідромеханічна система	Електромагнітна система	
	Перша система аналогій	Друга система аналогій
Переміщення $h = \int v dt$	Заряд $q = \int i dt$	Потокозчеплення $\psi = \int u dt$
Швидкість $V=h'$	Струм $I=q'$	Напруга $U=\psi'$
Сила P	ЕРС e	Струм i
Маса m	Індуктивність L	Ємність C
Механічний опір r	Опір R	Провідність G
Жорсткість C	Інверсна ємність $S=c^{-1}$	Інверсна індуктивність Γ
В'язкість F	Інерційність τ	Інерційність τ
Кінетична енергія $T_M = \frac{1}{2} m v^2$	Енергія магнітного поля $W_M = \frac{1}{2} L i^2$	Енергія електричного поля $W'_E = \frac{1}{2} C u^2$
Потенціальна енергія $\Pi_M = \frac{1}{2} C h^2$	Енергія електричного поля $W_E = \frac{1}{2} S q^2$	Енергія магнітного поля $W'_M = \frac{1}{2} \Gamma \psi^2$
Потужність розсіювання $D_M = \frac{1}{2} r v^2$	Потужність розсіювання $D_E = \frac{1}{2} R i^2$	Потужність розсіювання $D'_E = \frac{1}{2} G u^2$

Фактично існують дві системи аналогій. Перша система аналогій між гідромеханічними і електромагнітними колами більшою мірою відповідає їх фізичній природі, тому, в основному, переважно користуються нею, однак в деяких випадках застосування другої системи аналогій надає простіші рівняння.

З наведених систем аналогій випливає, що ЕРС в електричному ланцюзі аналогічна силі, індуктивність аналогічна масі й має інерційність, а енергія, що запасається в магнітному полі, є кінетичною енергією. Конденсатор аналогічно пружині, запасє енергію, яку слід вважати потенціальною. Активний опір діє аналогічно гідромеханічному в'язкому опору, а енергія, що виділяється на ньому, розсіюється у вигляді тепла. Наведені аналогії дозволяють узагальнювати опис енергетичних перетворювачів.

Узагальнену механічну систему перетворення енергії, що має S степенів вільності, можливо подати рівняннями Лагранжа другого роду

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{dT}{dh_s} - \frac{dT}{dh_s} + \frac{dD}{dh_s} + \frac{d\Pi}{dh_s} = P_s,$$

де $s = 1 \dots S$

У рівнянні наведено такі складові: $\frac{d}{dt} \cdot \frac{dT}{dh_s} - \frac{dT}{dh_s}$ – сили інерції за Даламбером; $\frac{dD}{dh_s}$ – сили в'язкого тертя; $\frac{d\Pi}{dh_s}$ – сили протидії; P_s – узагальнені зовнішні сили (моменти).

Наприклад, для гідрогенератора система, що має одну степінь вільності й здійснює обертальний рух щодо координати переміщення, відповідно

$$h = \varphi, \quad h' = \omega, \quad h'' = \varepsilon,$$

а енергетична складова

$$T = J \frac{\omega^2}{2}, \quad \Pi = \frac{1}{2} \sigma \cdot \varphi^2, \quad D = \frac{1}{2} p \cdot \omega^2,$$

зовнішній фактор $P_s = M_B$.

Одержимо рівняння

$$J\varepsilon - \frac{dJ}{d\varphi} \cdot \frac{\omega^2}{2} + \rho\omega + \sigma\varphi^2 = M_B.$$

Коли момент інерції J не залежить від кута повороту, як це часто буває на практиці,

$$\frac{dJ}{d\varphi} = 0$$

й рівняння приймає вигляд:

$$J\varepsilon + \rho\omega + \sigma\varphi^2 = M_B.$$

Таким чином можливо уявити собі механічну складову енергодинаміки гідроагрегату. Загальне рівняння гідроенергетичного процесу

$$P = QH,$$

де P – потужність гідроелектричної станції або агрегату; Q – витрата енергоносія; H – напір.

Для пригребельної гідроелектричної станції енергопроцес у достатньо загальному уявленні, [3] можливо записати рівнянням

$$(q + q_c)(h_o - x - z) = p,$$

де q – витрата за притоком; q_c – витрата запасу водосховища; h_o – найвища відмітка верхнього б'єфу; x – глибина спрацювання; z – відмітка нижнього б'єфу або втрати напору в деривації; p – потужність.

Найбільш загальним і строгим рівнянням енергетичного процесу гідроенергетичної установки вважається наступне диференціальне рівняння

$$\left[q(t) - \omega(h) \frac{dh}{dt} \right] [h - z(Q) - \Delta H(Q, h)] l = p(t),$$

де $q(t)$ – поточний приток верхнього б'єфу; h – поточна позначка верхнього б'єфу; $\omega(h)$ – поточна площа верхнього б'єфу; $\omega(h) \frac{dh}{dt}$ – функція балансу наповнення (витрат) верхнього б'єфу; Q – робоча витрата гідроелектричної станції; $z(Q)$ – функція нижнього б'єфу від робочої витрати; $\Delta H(Q, h)$ – поточні втрати напору в деривації; $p(t)$ – поточна потужність установки.

У наведеному рівнянні робоча витрата в свою чергу також являє собою функцію поточних параметрів

$$Q = q(t) - \omega(h) \frac{dh}{dt}.$$

Робоча витрата гідроенергетичної установки може бути менше поточної притоки $q(t)$ при додатному значенні dh і наповненні водосховища. Від'ємне значення dh відповідає його витраті.

Функція нижнього б'єфу визначається як

$$z = z_0 + aQ^n,$$

де z_0 – початкова позначка рівня.

Функція втрат напірного деривату

$$\Delta H = \beta Q^2,$$

де β – коефіцієнт, визначуваний технічними характеристиками деривату.

При цьому існує можливість математичної інтерпретації графіків і таблиць спостережень втрат верхнього і нижнього б'єфів

$$z + \Delta H = (a + a_1 h)Q + (b + b_1 h)Q^2.$$

Наведене рівняння дозволяє розв'язувати як загальні, так і окремі задачі організації гідроенергетичного процесу. Слід зазначити, що рівняння енергетичного процесу можливо застосовувати як до окремої енергетичної установки, їх групи, так і каскаду, розташованому на загальному дериваті, що переробляють загальний потік енергетичного носія.

Слід відзначити, що з динамічної точки зору наведені співвідношення коректно відображать достатньо повільні зміни гідроенергетичних процесів. Між тим, існують й досить швидкі зміни енергетичних станів, що мають суттєві впливи. Тому вважається доцільним створення потрібних рівнів опису динамічних станів. Такому підходу сприяють балансні методи.

Рівняння балансу пов'язує основні види змін енергії в системі: Так, зокрема, для електромеханічної системи з урахуванням основних складових процесу: зміни енергії поля ΔW_f і механічної енергії ΔW_m , зміна електричної енергії

$$\Delta W_e = \Delta W_f + \Delta W_m.$$

З наведеного співвідношення випливає, що, коли електрична енергія в електромагнітному пристрої перевищує енергію поля, то її частина переходить в механічну форму і навпаки. Видно також роль енергії магнітного поля як проміжного виду енергії при її перетворенні в механічну. Найбільш важливим висновком з наведеного рівняння є те, що механічна робота, що виконується за рахунок ΔW_m , може бути визначена через дві електричні величини i і Ψ :

$$\begin{aligned} \Delta W_m(i, h) &= \Delta W_e(i, h) - \Delta W_f(i, h); \\ \Delta W_m(\Psi, h) &= \Delta W_e(\Psi, h) - \Delta W_f(\Psi, h). \end{aligned}$$

Енергетичні складові в даному разі безпосередньо пов'язані з механічними переміщеннями h .

Система рівнянь Лагранжа–Максвелла, приймаючи за узагальнену координату h – кут повороту \square , за умови, що зовнішня сила відсутня, складається з двох – механічного і електричного:

$$\begin{aligned} (J\varepsilon + \rho\omega + \sigma\varphi) - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L}{\partial \varphi} \cdot i^2 - \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \cdot i + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial S}{\partial \varphi} \int i^2 dt &= 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \varphi} \cdot \omega \cdot i - \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \cdot \omega + L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt &= u. \end{aligned}$$

З першого, механічного, рівняння отримуємо діючі сили. Складові другого, електричного рівняння по суті є електричними реакціями системи. Вони описують електромеханічну систему.

У механічному враховуються моменти, що виникають при електромеханічному перетворенні енергії, а саме

- $\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L}{\partial \varphi} \cdot i^2$ – електромагнітний момент, що виникає через зміни індуктивності при зміні кута повороту;
- $\frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \cdot i$ – магнітоелектричний момент, що діє на провідник або контур із струмом в магнітному потоці;
- $\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial S}{\partial \varphi} \int i^2 dt$ – момент, що викликається електричним полем при механічній зміні ємності конденсатора.

У реальних технічних умовах в енергетичних перетворювачах переважно діє тільки одна з перелічених сил – електромагнітна, магнітоелектрична, електростатична. Для гідроагрегату переважає електромагнітна складова моментів.

Складові другого, електричного, рівняння по суті є електричними реакціями системи:

- $E_L = \frac{\partial L}{\partial \varphi} \cdot \omega \cdot i$ – протиЕРС, що викликається зміною індуктивності при повороті контуру зі струмом;
- $E_\omega = \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \cdot \omega$ – ЕРС індукції, викликана обертанням контуру в магнітному полі;
- $E = L \cdot \frac{di}{dt}$ – ЕРС самоіндукції;
- $U_C = \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt$ – напруга конденсатора;

- $R \cdot i$ – падіння напруги на опорі.

Еквівалентна схема електричного кола такої системи розглянута на рис. 3.

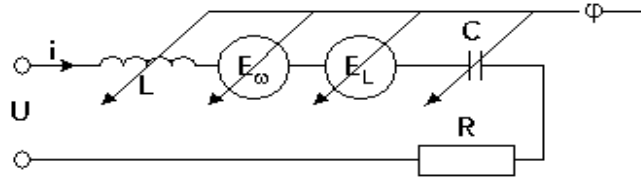


Рис. 3. Еквівалентна схема узагальненої електромеханічної системи

У даній еквівалентній схемі представлені ідеалізовані компоненти, L , R , C , а також E_ω і E_L . Всі вони, окрім R , залежать від відносного положення елементів системи.

Для випадку пов'язаних контурів у загальному вигляді енергія електричного поля в об'ємі V записується інтегралом

$$W_3 = \frac{1}{2} \cdot \int E \cdot D \cdot dV,$$

де E – вектор напруженості електричного поля, D – вектор зсуву.

Енергія магнітного поля в об'ємі V також виражається інтегралом

$$W_M = \frac{1}{2} \cdot \int B \cdot H \cdot dV,$$

де B – вектор магнітної індукції, H – вектор напруженості магнітного поля.

Для n магнітно-зв'язаних контурів справедливе співвідношення:

$$W_M = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^n \Psi_j \cdot i_j,$$

де Ψ_j – потокозчеплення контурів,

або

$$W_M = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n L_{jk} \cdot i_j \cdot i_k,$$

де L_{jk} – індуктивності й взаємні індуктивності контурів

Тоді для одиночного контуру із струмом енергетичні співвідношення

$$W_M = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 = \frac{1}{2} \Psi \cdot i,$$

для двох контурів

$$W_M = \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot i_1^2 + M \cdot i_1 \cdot i_2 + \frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot i_2^2 = \frac{1}{2} (\Psi_1 \cdot i_1 + \Psi_2 \cdot i_2);$$

для контуру із струмом, поміщеного в магнітний потік Φ , маємо співвідношення:

$$W_M = \frac{1}{2} \cdot (L \cdot i^2 + \Psi \cdot i),$$

де L – індуктивність контуру, Ψ – потокозчеплення зовнішнього потоку з контуром.

Канал перетворення енергії, що реалізується гідроагрегатом, фактично пов'язує між собою дві різні системи – гідравлічну й електричну, рис. 4.

Пропоноване уявлення наскрізного каналу перетворення енергії гідроагрегатом у вигляді пружної гідроелектродинамічної моделі дозволяє розглянути єдність впливів різнорідних стихій.

Слід зазначити, що обидві системи, виходячи з аналогій, фактично можуть бути подані еквівалентними пружними елементами з певними динамічними характеристиками. У ряді практичних випадків їх можна подати механічними зв'язками торсіонного типу. Елемент G відповідає властивостям гідравлічної складової енергетичного процесу, а елемент E – відповідно властивостям електричної складової. Таке уявлення є цілком коректним з урахуванням демпфуючих властивостей кожної діючої системи. По суті гідроагрегат можливо подати елементом, підвішеним на пружних елементах між двома основами, в свою чергу також пружними: гідравлічною і електричною. Це може бути основою теоретичної моделі взаємних впливів різнорідних стихій, рис. 5.

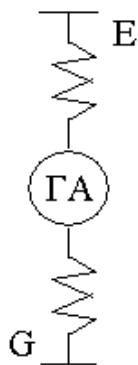


Рис. 4. Схема аналізу до впливів каналу перетворення енергії

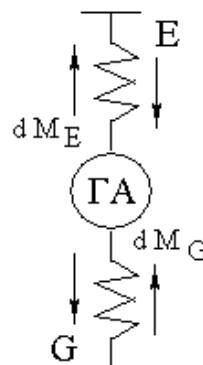


Рис. 5. Основа поліпредметної гідроелектродинамічної моделі

Така пружна модель дозволяє системно розглядати динамічну роботу гідроагрегату з урахуванням впливів щонайменше двох метасистем – гідравлічної і електричної:

$$dM_{GA} = \sum_{i=0}^N dM_{Gi} + \sum_{j=0}^K dM_{Ej} .$$

Суттєвий вплив на динамічні робочі показники обладнання в такій системі мають стала часу: обладнання й контурів керування. Гідромеханічні сталі часу визначаються конструктивно спорудами та механізмами й включають характеристики проточного тракту, напрямного апарата та гідротурбіни. Електромеханічні сталі часу теж є конструктивним фактором гідрогенератора. Окремо впливають також сталі часу кіл керування у вигляді регуляторів швидкості й напруги. Слід зазначити, що сумарна стала часу гідроагрегату Дніпровської ГЕС в середньому складає величину близько 8 с. Це досить велика динамічна складова, що безпосередньо визначає динамічну його ефективність.

Рівняння обертання вала агрегату має вигляд

$$J \cdot \frac{\partial \omega}{\partial t} = M_{\Gamma} + M_{en} , \quad (1)$$

де J – момент інерції ротора; ω – частота обертання; M_{en} – електричний момент; M_{Γ} – гідравлічний момент турбіни.

При роботі гідрогенератора під навантаженням у складі енергосистеми в обмотці статора проходить струм. Цей струм створює своє магнітне поле, яке гальмує обертання ротора. При цьому виникає електромагнітний момент [7], який в трифазній машині еквівалентний виразу

$$M_{эм} \approx \frac{3U}{\omega} \cdot \frac{E_0}{x_{qd}} \cos \theta \cdot \theta = M_c \cdot \theta , \quad (2)$$

де θ – кут навантаження між векторами ЕРС E_0 і напруги U , x_{qd} – приведений синхронний опір, ω – кутова частота, M_c – питомий синхронізуючий момент,

$$M_c \approx \frac{3U}{\omega} \cdot \frac{E_0}{x_{qd}} \cos \theta$$

При цьому енергосистему можливо подати у вигляді своєрідного маховика, що обертається з постійною частотою. Гідроагрегат, у свою чергу також являє собою маховик, що складається з ротора генератора і робочого колеса (РК) турбіни, рис. 6.

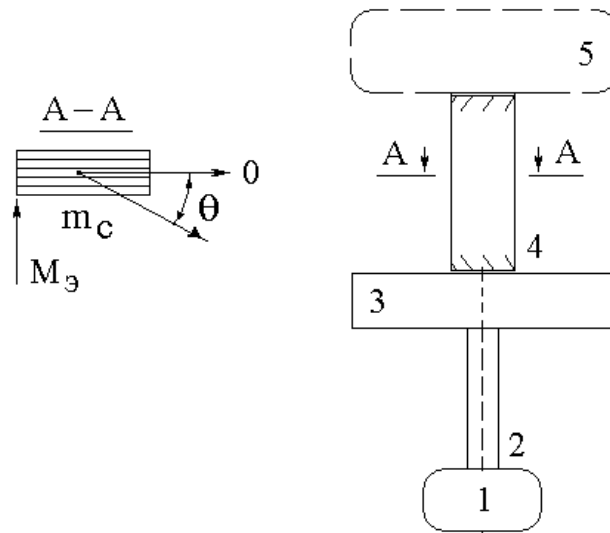


Рис. 6. Гідроелектродинамічна модель гідроагрегату:
1 – турбіна; 2 – вал; 3 – гідрогенератор; 4 – торсіон; 5 – енергетична система

Механічною моделлю зв'язку гідрогенератора з енергосистемою може служити пружний торсіон з крутильною жорсткістю m_c . Кут закручування торсіона й визначає режим роботи гідрогенератора. Якщо $\theta > 0$ – електрична енергія генерується (генераторний режим), якщо $\theta < 0$ – електрична енергія перетворюється в механічну (режим двигуна). Аналогічно, як торсіон, виглядає й зв'язок турбіни з гідравлічною системою. Це пояснює коливання навантаження.

Одною з головних технічних причин коливань робочого потоку води гідроенергетичної системи у вигляді гідроагрегату, окрім його нестабільності й збурень за умов водоводу, є нестійкість лопаток напрямного апарата (НА). Рівняння руху лопатки НА має вигляд

$$J \cdot \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} + C \frac{\partial \alpha}{\partial t} + K_0 \cdot \alpha = M_\Gamma + M, \quad (3)$$

де α – кут “атаки” лопатки до робочого потоку; J – момент інерції; C – в'язке тертя середі; K_0 – крутильна жорсткість кріплення лопатки; M_Γ – постійний гідравлічний момент потоку води; M – збурювальний момент пульсацій потоку.

Існують та впливають також, як зазначено вище, істотні сталі часу ПД–регуляторів швидкості турбіни та напруги гідрогенератора. Вони також роблять свій вагомий внесок за контуром управління в коливальну складову роботи агрегату, девіацію параметрів та робочих характеристик і відповідні втрати потужності, а також істотно знижують загальний рівень його динамічної ефективності.

Крім того, важливою причиною турбулентних пульсацій потоку є притаманна нестійкість руху рідини. При деяких критичних параметрах потоку, визначуваних числом Рейнольдса, випадкові хвилі збурень в рідині не затухають, а посилюються. При цьому відбувається якісна зміна структури потоку і характеристика його руху. Із стаціонарного, ламінарного руху, потік переходить в турбулентний. Частинки рідини при цьому не течуть за своїми стабільними траєкторіями, лінії струму змінюються у просторі та часі, потік стохастично пульсує й об'ємно перемішується.

При перехідних процесах, нерозрахункових режимах і інших нештатних ситуаціях у відсмоктуванні трубі за певних умов можливо виникнення турбулентного вихрового або кавітаційного потокового джгута, рис. 7.

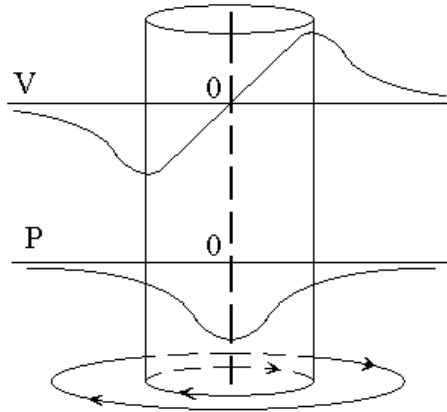


Рис. 7. Загальна схема формування вихорового джугута

Цілком імовірно, що в гідротурбіні відбувається саме унікальне об'єднання різнорідних зазначених чинників, яке ніде більш не зустрічається, у тому числі й перерахованих механізмів нестабільності. Течія відбувається не тільки при великих числах Рейнольдса, але і на податливій, віброуючій поверхні в умовах замкнених об'ємів у вигляді довгих водоводів, які можуть служити резонаторами хвиль збурення.

Втрати на тертя, завдяки вимогам до їх поверхонь у таких водоводах досить малі. Добротність водовода як коливальної системи чимала й складає декілька сотень. Тому в них може з'являтися й існувати система стоячих хвиль. За певних умов ці хвилі можуть збуджуватися при роботі гідроагрегату, накопичувати суттєву енергію. Тоді в системі водовод – гідроагрегат можуть виникати автоколивання.

Враховуючи, що на власні форми коливання фактично досить відчутно впливає імпеданс водяного стовпа, залежний від швидкості звуку у відсмоктувальній трубі, можливо зрозуміти, чому впускання повітря під робоче колесо часто зменшує вібрацію й кавітацію в проточній частині.

У натурних турбін в деяких робочих зонах з'являються пульсації тиску в проточній частині, знижується ККД. Виникають кавітація й гідроудари, спостерігається також значне коливання потужності гідроагрегату. В результаті цього явища фактично зменшується регульовальний діапазон, гідроагрегат не може вийти на проектну потужність, а іноді це призводить до пошкоджень і аварійних ситуацій.

Як зазначалося раніше, гідрогенератор в енергосистемі поводить себе як гармонійний осцилятор. У частотному діапазоні 0, 5 – 3 Гц у нього фактично існує пологий низькодобротний резонанс, який реєструється агрегатною системою вібромоніторингу. Це означає, що на практиці гідроагрегат досить чутливий до коливань обертового моменту, залежного від пульсацій тиску у водоводі у вказаному частотному діапазоні. При цьому коливання моменту у свою чергу приводять до зміни кута навантаження гідрогенератора в енергосистемі з амплітудою

$$\theta_0 \approx \frac{M_c}{D} \sqrt{\frac{J}{km_c}}$$

Таким чином, існуюча вагома нестабільність гідромеханічного тракту перетворення енергії спостерігається на роботі й показниках ефективності гідроагрегату в цілому. Окрім цього, як вказано вище, існує й динаміка електромеханічної частини енергетичного перетворювача, обумовлена їх інерційністю.

Слід детальніше розглянути чинники і вплив інерційності гідрогенератора і системи збудження.

Генератор має демпферну обмотку, що зменшує крутильні коливання ротора щодо енергосистеми. Електромагнітний момент цієї обмотки:

$$M_D = \frac{k \cdot 3U^2}{\omega \cdot r_2'} S = \frac{3U^2}{\omega^2 \cdot r_2'} \cdot \frac{d\theta}{dt} = D \cdot \frac{d\theta}{dt}, \quad (4)$$

де S – ковзання ротора; k – число пар полюсів; r_2' – зведений опір ковзання. Звідси рівняння руху ротора агрегата можливо записати так:

$$\frac{J}{k} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + D \frac{\partial \theta}{\partial t} + M_c \cdot \theta = M_T. \quad (5)$$

Це рівняння гармонійного осцилятора з власною частотою

$$\omega_0 \approx \sqrt{\frac{M_c \cdot k}{J}}, \text{ с}$$

і добротністю

$$Q_k \approx \omega \cdot \frac{J}{kD} = \frac{1}{D} \cdot \sqrt{\frac{Mc \cdot J}{k}}$$

Під дією збурювального моменту синхронна машина здійснює загасаючі коливання. Їх називають синхронними коливаннями. При цьому змінюється кут θ . Відповідно змінюються електричний момент і потужність генератора. Частота синхронних коливань машини зазвичай знаходиться в діапазоні 0,5 ÷ 3 Гц.

Наведені діючі впливи визначають загальну алгоритмічну організацію програмного керування гідроагрегатом. Саме програми керування втілюють і забезпечують основні робочі процеси перетворювача енергії. Принципово робота системи керування має задовільняти рівняння вигляду

$$P_e P_m = P_a,$$

або

$$P_m - P_e = 2H \frac{d\omega}{dt}, \quad (6)$$

де P_e – електричний момент гідрогенератора; P_m – механічний момент валу ротора; P_a – прискорююча потужність; ω – кутова швидкість; H – постійна часу інерції, с.

Зміна електричного моменту P_e після раптового зменшення навантаження знижує робочу стабільність гідроагрегату, рис 8. При цьому рух ротора прискорюється і виникають коливання з дуже малим демпфуванням. Синусоїдні коливання кутової швидкості ротора випереджають електричний момент на 90° .

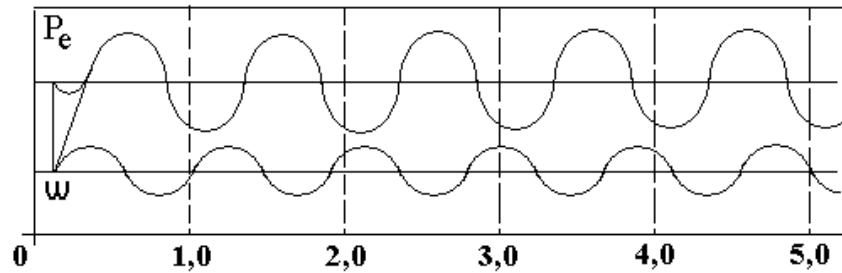


Рис. 8. Осцилограми зміни електричного моменту і кутової швидкості ротора

Електричну потужність і момент можна записати так:

$$P_e(f\nu) = \frac{U_f \cdot U_\infty}{x_d(f\nu) + x_e} \sin(\theta) + \frac{U_\infty [x_d(f\nu) - x_q(f\nu)]}{2[x_d(f\nu) + x_e] \cdot [x_q(f\nu) + x_e]} \sin(2\theta), \quad (7)$$

де: U_f – напруга збудження, в. од.; U_∞ – напруга мережі, в. од.; θ – кут навантаження, градус; x_d – синхронний індуктивний опір подовжньої осі, в. од.; x_q – синхронний індуктивний опір поперечної осі, в. од.; x_e – зовнішній індуктивний опір, в. од.; f – частота коливань, Гц.

З рівняння виходить, що електричний момент P_e пропорційний напрузі збудження U_f . Таким чином можливо регулювати електричний момент, пропорційно змінюючи напругу збудження. Однак цьому заважають динамічні якості енергетичного перетворювача й вимагають додаткових технічних заходів. Потрібне щонайменше демпфонування коливань навантаження.

Якісне демпфування досягається при зміні потужності P_m або електричної потужності P_e у фазі з кутовою швидкістю ротора. Тоді для демпфування коливань потужності стабілізатор потужності має забезпечити додатковий компонент напруги збудження, впливаючи на електричний момент у фазі з

кутовою швидкістю ротора.

Проте безпосереднє використання сигналу ω для отримання сигналу стабілізації неминуче призводить до виникнення функціональних обмежень на середніх і високих частотах. Дані обмеження можуть викликати небажані спотворення початкового сигналу регулятора напруги. Окрім того, вказані обмеження сигналу ω , посилені стабілізатором потужності, можуть призвести до аварійних режимів роботи гідрогенератора. Як вихід у даній ситуації, в діючих системах збудження передбачена досить складна своєрідна зміна сигналів, фактично спрямована на компенсацію інерційності керуючих кіл гідроагрегату у вигляді ПД – регуляторів. Це – суттєва надмірність, що підвищує складність формування керуючих впливів й фактично знижує загальну динамічну ефективність енергетичного обладнання ГЕС.

Слід також відзначити, що кут з урахуванням фіксації початкового положення полюса ротора відносно фази А, рис. 9

$$\Theta = \int_0^t \omega \cdot dt + \vartheta; \quad \frac{d\Theta}{dt} = \omega, \quad (8)$$

де ϑ – початковий кут відліку часу; Θ – кут відносного положення фази А.

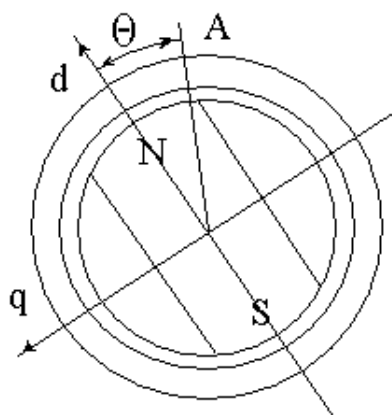


Рис. 9. Схема до визначення відносного положення фази А

При дослідженні процесів перетворення енергії в синхронних машинах, що працюють паралельно з мережею, використовується низка істотних припущень.

Вважається, що мережа має нескінченно велику потужність, тобто її опір дорівнює нулю й напруга на виводах генератора залишається незмінною при будь-яких режимах його роботи. Робота окремої синхронної машини при цьому практично не впливає на мережу.

При цьому синхронна машина після підключення до мережі працює синхронно з іншими машинами, але і цей процес динамічний по суті, оскільки безпосередньо пов'язаний з $\Delta\Theta$.

Слід також розрізняти динаміку мікро– і макро– рівнів. При цьому своєрідним мікрорівнем є системні взаємодії синхронної машини в процесі стабільної мережевої роботи, рис. 10.

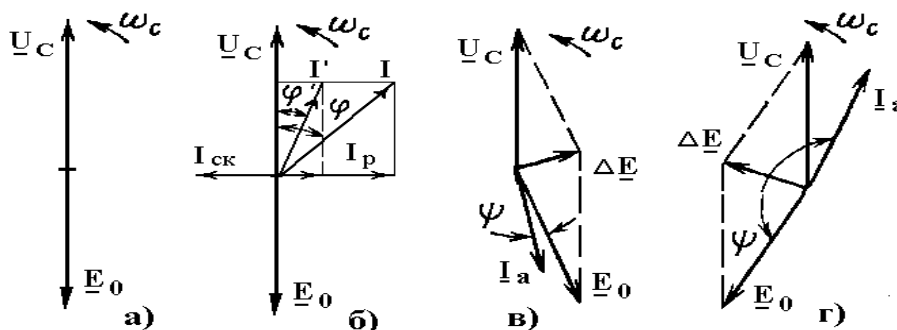


Рис. 10. Механізми системних взаємодій синхронного генератора:
а – режим холостого ходу; б – режим синхронного компенсатора;
в – режим прискорення; г – режим уповільнення

Механізм динамічної стабілізації руху ротора гідрогенератора діє за такою схемою: якщо ротор машини починає прискорюватися, з'являється сила ΔE , яка в контурі мережа – машина створює зрівноважувальний струм, під дією якого ротор знову займе колишне положення (див. рис. 10, в). Якщо

ротор сповільнюється, ΔE змінює напрям і зрівняльний струм створює момент, прискорюючий ротор, який поверне машину в початковий синхронний стан (див. рис. 10, з).

Результуюча ЕРС ΔE створює струм

$$\Delta I_a = -J dE/x_c, \quad (9)$$

де X_c – синхронний опір машини.

Зрівноважувальний струм визначається опором машини, оскільки мережа нескінченної потужності має опір, який дорівнює нулю. При цьому враховується тільки індуктивний опір синхронної машини, оскільки активним опором можливо знехтувати.

Слід враховувати також, що динаміка перехідних процесів гідрогенератора безпосередньо залежить від якості і рівня керування збудженням, інерційних, комунікаційних характеристик каналу регулювання напруги, особливостей енергоінформаційного обміну [7].

Таким чином, гідроелектродинамічні складові, що безпосередньо впливають на якість реалізації технологічного процесу енергетичних перетворень гідроагрегату ГЕС, мають враховуватися при коректній реалізації й аналізі динамічних режимів. На практиці це вимагає, в особливості, подолання інерційності кіл керування й узгодженості інерційних характеристик виконавчих пристроїв, що безумовно сприяє підвищенню динамічної стійкості й ефективності енергетичних перетворювачів.

Список літератури

1. Радченко В. В. Матеріальні, енергетичні та інформаційні складові технічних систем / В. В. Радченко // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. - 2011 р. - Вип. 87. – С. 76 – 79.
2. Радченко В. В. Основа матеріально - енергетично - інформаційного підходу до аналізу й побудови електротехнічних систем. / В. В. Радченко // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. - 2012 р. - Вип. 88. – С. 20 – 22.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 231 с.
4. Клишевич Г. В. Энергопроцесс гидроэнергетических установок / Г. В. Клишевич. – Л.: Энергия, 1969. – 164 с.
5. Этинберг И. Э., Радхман Б. С. Гидродинамика гидравлических турбин / И. Э. Этинберг, Б. С. Радхман. – Л.: Машиностроение, 1978. – 279 с.
6. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. – Л.: Наука, 1985. – 502 с.
7. Радченко В. В. Форсування збудження й динаміка перехідного процесу гідрогенератора / В. В. Радченко // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. - 2014 р. - Вип. 92. – С. 83 – 90.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.