

УДК 681.3

ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНА АНАЛОГІЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ — ОБЕРТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ВІДЦЕНТРОВИХ ГІДРАВЛІЧНИХ МАШИН

© Костишин В. С., 2002

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

На основі застосування єдиної теорії кіл встановлено ізоморфізм математичних виразів, що описують обертові електричні та відцентрові гідравлічні машини.

Про ізоморфізм математичних виразів, що описують фізичні процеси в електричних та гідравлічних підсистемах, загальновідомо [1]. Однак традиційно розглядалися найпростіші моделі підсистем — ділянки гідро- та струмопроводу, в той час як порівняльний аналіз складних перетворювачів енергії — гідравлічних та електричних машин в науковій літературі до цих пір був відсутнім. Такий стан справ зумовлений тим, що теорії вищезгаданих машин історично розвивалися принципово різними шляхами. Так теорія електричних машин (ЕМ) отримала бурхливий розвиток завдяки застосуванню теорії електричних кіл, яка дає змогу ефективно описувати енергообмін в електросистемі на основі топологічних рівнянь Кірхгофа. Ці рівняння зв'язують в єдину систему фазові змінні “силового” (напруга) та “швидкісного” (струм) характеру за допомогою поняття електричного опору (імпедансу) ділянки кола. В свою чергу рівняння Кірхгофа надзвичайно ефективно і наглядно ілюструються відповідними заступними схемами — графічними еквівалентами, які відображають реальні фізичні процеси передачі та перетворення енергії в ЕМ [2].

Теорія відцентрових гідравлічних машин (ВГМ) (за винятком ідеалізованих, де процеси описані загальновідомим рівнянням Ейлера [3]), базується на емпіричних та напівемпіричних формулах, які не дають змоги адекватно відобразити складні процеси енергообміну в гідромашинах і отримувати узагальнюючі висновки [4].

Застосування єдиної теорії кіл [2] для опису ВГМ відкрило нові аспекти в їх моделюванні і надало можливість встановити нові електрогідравлічні аналогії, які існують між ЕМ та ВГМ. В основі аналогії безперечно лежить подібність просторової будови цих обертових машин. Як ЕМ, так і ВГМ складається з нерухомої (статор) і з обертової (ротор) частин. В обох машинах є вхід і вихід енергоносія, приріст (зменшення) енергії на виході здійснюється за рахунок підводу (відводу) механічної енергії обертяння через вал машини, а роль електричних полюсів ЕМ відіграють лопаті ВГМ. Крім того, обидві

машини можуть змінювати напрям руху енергоносія, тобто працювати в режимах генератора (насоса) або двигуна (турбіни).

Спочатку розглянемо ідеалізовану ВГМ — машину без втрат з нескінченною кількістю ($K_f = \infty$) безмежно тонких лопатей, яка працює з ідеальною рідиною. Використання понять теорії кіл дало змогу отримати модифіковане рівняння Ейлера [5] у вигляді балансу тисків, якому відповідає скалярна заступна схема ідеалізованої ВГМ (рис. 1), тобто

$$\rho g H_\infty = \rho g H_0 - R_{ВГМ} Q_\infty, \quad (1)$$

де H_∞ , Q_∞ — відповідно напір та витрата рідини на виході ВГМ; H_0 — значення напору в безвитратному режимі холостого ходу ($Q_\infty = 0$); $R_{ВГМ}$ — внутрішній гідроопір ВГМ; ρ , g — відповідно густина робочої рідини та прискорення вільного падіння.

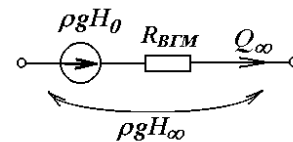


Рис. 1. Заступна схема ідеалізованої ВГМ

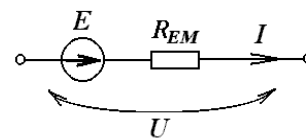


Рис. 2. Заступна схема ЕМ постійного струму

Заступна схема (рис. 1) та рівняння (1) ідеалізованої ВГМ відповідно аналогічні заступній схемі (рис. 2) та рівнянню рівноваги напруг ЕМ постійного струму з незалежним збудженням [6]:

$$U = E - R_{ЕМ} I, \quad (2)$$

де U , I — напруга та струм на виході (затискачах) ЕМ; E — електрорушійна сила, значення якої рівне напрузі ЕМ в режимі холостого ходу ($I=0$); $R_{ЕМ}$ — внутрішній опір ЕМ.

Відповідно, аналогічними будуть робочі харак-

теристики вищезгаданих машин (рис. 3, 4), що мають вигляд прямих ліній, точки перетину яких з осями координат відповідають екстремальним режимам холостого ходу (XX) та короткого замикання (КЗ), а тангенс кута нахилу рівний внутрішньому опору машини:

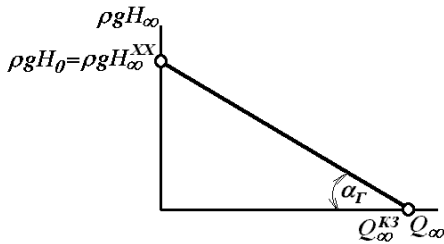


Рис. 3. Характеристика напору ідеалізованої ВГМ

$$\left. \begin{aligned} R_{ВГМ} &= \frac{\rho g H_0}{Q_{\infty}^{K3}} = \operatorname{tg} \alpha_{\Gamma}, \\ R_{EM} &= \frac{E}{I^{K3}} = \operatorname{tg} \alpha_E. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В табл. 1 приведені аналоги параметрів ідеалізованої ВГМ та ЕМ постійного струму незалежного збудження.

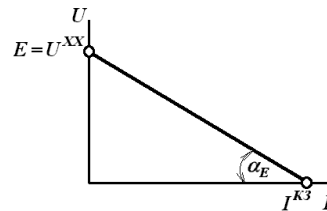


Рис. 4. Робоча характеристика ЕМ постійного струму

Таблиця 1 - Аналоги параметрів ідеалізованої ВГМ та ЕМ постійного струму незалежного збудження.

Ідеалізована ВГМ	ЕМ постійного струму незалежного збудження
$\rho g H_{\infty}$ — тиск на виході ВГМ	U — постійна напруга на затискачах ЕМ
$\rho g H_0$ — тиск на виході ВГМ в режимі XX	E — електрорушійна сила, значення якої рівне напрузі на затискачах ЕМ в режимі XX
Q_{∞} — витрата на виході ВГМ	I — постійний електричний струм
$R_{ВГМ}$ — внутрішній гідравлічний опір	R_{EM} — внутрішній електричний опір

Реальна ВГМ, яка має гідравлічні, об'ємні та механічні втрати енергії, працює з ньютонівською рідиною. За аналогією з синхронною ЕМ змінного струму вона моделюється в обертовій системі координат d, q , що жорстко зв'язана з робочим колесом (ротором) машини рівнянням балансу тисків у комплексній формі [5], якому відповідає така комплексна заступна схема (рис. 5):

$$\rho g \underline{H}_d = \rho g \underline{H}_{ек} - \underline{Q}_d (r_{ек} + jx_{ек}), \quad (4)$$

де $\underline{H}_d, \underline{Q}_d$ — відповідно зображуючі вектори дійсного напору та витрати рідини на виході ВГМ; $\underline{H}_{ек}$ — зображуючий вектор дійсного напору в режимі XX; $r_{ек}, x_{ек}$ — активний та інерційний еквівалентні гідравлічні опори реальної ВГМ; $j = \sqrt{-1}$ — уявна одиниця.

Синхронна ЕМ описується аналогічним виразу (4) рівнянням рівноваги напруг в комплексній формі [6], якому відповідає своя комплексна заступна схема (рис. 6) [6]:

$$\underline{U} = \underline{E}_q - \underline{I} (r_{CM} + jx_d). \quad (5)$$

Тут $\underline{U}, \underline{I}$ — відповідно зображуючі вектори напруги та струму на затискачах синхронної ЕМ; \underline{E}_q — зображуючий вектор електрорушійної сили ЕМ по поперечній осі q , значення якої наближено рівне напрузі машини в режимі XX; r_{CM}, x_d — активний та синхронний індуктивний (по поздовжній осі d) опори синхронної ЕМ.

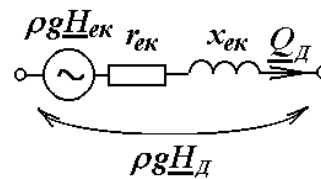


Рис. 5. Заступна схема реальної ВГМ

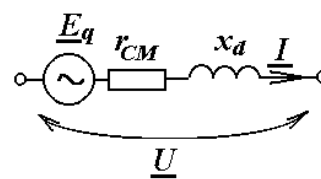


Рис. 6. Заступна схема синхронної ЕМ змінного струму

Відношення активного та інерційного гідравлічних опорів є відцентровою формою числа Рейнольдса Re_B , яка визначає характер руху рідини в протічній частині ВГМ [5], тобто

$$Re_B = \frac{x_{ек}}{r_{ек}} = \frac{\omega_p D_{ек}^2}{32\nu}, \quad (6)$$

де ω_p — кутова частота обертання ротора (колеса) ВГМ, $D_{ек}$ — еквівалентний діаметр спірального відводу машини, ν — коефіцієнт кінематичної в'язкості

робочої рідини.

Очевидно, що в електротехніці аналогом числа Рейнольдса є постійна часу T_a затухання аперіодичної складової струму КЗ ЕМ (так звана “добротність” коливального контуру) [6], яка визначається так:

$$T_a = \frac{x_d}{\omega r_{CM}}, \quad (7)$$

де ω — кутова частота струму в електромережі.

Ще однією надзвичайно важливою характеристикою реальної ВГМ є синусоїдна залежність її корисної (гідравлічної) потужності N_K від кута навантаження γ_p машини, введенного до розгляду у відповідності до теорії синхронної ЕМ змінного струму [5], тобто

$$N_K = N_K^{max} \sin \gamma_p, \quad (8)$$

де N_K^{max} — максимальне значення корисної потужності ВГМ.

Як загальновідомо [6], активна потужність N_{CM} синхронної ЕМ описується рівнянням, аналогічним (8), тобто

$$N_{CM} = N_{CM}^{max} \sin \delta, \quad (9)$$

де N_{CM}^{max} , δ — відповідно максимальне значення активної потужності та кут навантаження (вибігу ротора) ЕМ.

В табл. 2 приведені аналоги параметрів реальної ВГМ та синхронної ЕМ змінного струму.

Рівняння (8) і (9) відображають одну з визначальних аналогій між ВГМ та ЕМ, використання якої дало змогу синтезувати низку зручних для практичного використання тригонометричних виразів для аналітичного розрахунку робочих характеристик ВГМ [7-9], правильність яких підтверджена співпадінням розрахункових та отриманих експериментальним шляхом залежностей напору, споживаної потужності та ККД гідромашини від її витратного навантаження. В їх основі лежить використання номінального значення кута навантаження машини $\gamma_p^{ном}$ як головного конструктивного параметра, визначення якого проводиться за каталоговими даними ВГМ.

Таким чином, підсумовуючи вищесказане, можна зробити висновок про незаперечне існування аналогії між фізичними процесами, які протікають у відповідних гідро- та електромеханічних перетворювачах енергії — ВГМ та ЕМ.

В свою чергу, формули (1-9) встановлюють ізоморфізм математичних виразів, що описують ці машини, відкриваючи нові перспективи використання багатого досвіду моделювання ЕМ для опису та оптимізації режимів існуючих та синтезу нових високоефективних конструкцій ВГМ.

Таблиця 2 - Аналоги параметрів реальної ВГМ та синхронної ЕМ змінного струму.

Реальна ВГМ	синхронна ЕМ змінного струму
$\rho g H_d$ — тиск на виході реальної ВГМ	U — змінна напруга на затискачах ЕМ
$\rho g H_0$ — тиск на виході ВГМ в режимі ХХ	E_q — електрорушійна сила, значення якої рівне напрузі на затискачах ЕМ в режимі ХХ
Q_∞ — витрата на виході ВГМ	I — змінний електричний струм
$r_{ек}$ — активний внутрішній гідравлічний опір	r_{CM} — активний внутрішній електричний опір
$x_{ек}$ — інерційний внутрішній гідравлічний опір	x_d — індуктивний внутрішній електричний опір по поздовжній осі
N_K — корисна потужність	N_{CM} — активна потужність ЕМ
γ_p — кут навантаження ВГМ	δ — кут навантаження синхронної ЕМ
Re_B — відцентрова форма числа Рейнольдса	T_a — “добротність” коливального контуру

1. Системы автоматизированного проектирования: В 9-ти кн. / В. А. Трудоношин, Н. В. Пивоварова / Под ред. И. П. Норенкова. - М.: Высш. школа, 1986. - Кн.4. Математические модели технических объектов. - 160 с. 2. Костишин В. С. Застосування теорії розмірностей для встановлення точних фізичних аналогій // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 6. - С. 69-72. 3. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 416 с. 4. Вершинин И. М. К соотношению окружной, относительной и абсолютной скоростей в лопастных насосах // Изв. вузов СССР: Энергетика. -1991. - № 3. - С. 117-118. 5. Костишин В. Моделирование режимов работы відцентрових

насосів на основі електрогідравлічної аналогії. - Івано-Франківськ: Факел, 2000. - 164 с. 6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. - М.: Энергия, 1980. - 928 с. 7. Костишин В. С. Аналітичний вираз напірної характеристики відцентрового насоса // Нафтова і газова промисловість. - 2000. - № 1. - С. 50-52. 8. Костишин В. С. Аналітичний вираз характеристики потужності відцентрового насоса // Нафтова і газова промисловість. - 2000. - № 5. - С. 53-54. 9. Костишин В. С. Аналітичний вираз характеристики ККД відцентрового насоса // Нафтова і газова промисловість. - 2000. - № 6. - С. 47-48.

