

УДК 621.314

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІЙ СИСТЕМІ МЕРЕЖІ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ЇЇ ЕЛЕКТРИЧНА МОДЕЛЬ

М. І. Сотник

Сумський державний університет

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна. E-mail: nsotnik@mail.ru

В. С. Бойко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: vsboiko@bigmir.net

Розглянуто електромеханічну систему мережі водопостачання як багатостадійний перетворювач енергії, проаналізовані етапи її перетворення за частотою, кількістю фаз, виду енергії та накладанню енергетичних потоків, враховані також особливості фізичного процесу руху рідини в насосі, сформульовано вимоги до електричних моделей електромеханічних систем мереж водопостачання. Принцип побудови електричних моделей електромеханічних систем мереж водопостачання проілюстровано на прикладі насосного агрегату з відцентровим насосом, який має робоче колесо з трьома лопатями. Відмічено, що, аналізуючи електромагнітні процеси в електричній моделі, необхідно враховувати вличину активного опору контуру комутації, оскільки саме в такому випадку отриманий результат електричного моделювання буде адекватно відображати робочий процес реальної електромеханічної системи. Доведено, що електричні моделі електромеханічних систем мережі водопостачання не є простою сукупністю електричних моделей її енергетичних компонент. Елементи електричних моделей електромеханічних систем узагальнено враховують конструктивні, режимні, енергетичні та інші характеристики реальних об'єктів гідравлічної мережі.

Ключові слова: електромеханічна система, насос, енергія, водопостачання, енергоефективність.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СЕТИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Н. И. Сотник

Сумский государственный университет

ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, 40007, Украина. E-mail: nsotnik@mail.ru

В. С. Бойко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: vsboiko@bigmir.net

Рассмотрено электромеханическую систему сети водоснабжения как многоэтапный преобразователь энергии, проанализированы этапы ее превращения по частоте, количеству фаз, виду энергии и наложению энергетических потоков, учтены также особенности физического процесса движения жидкости в насосе, сформулированы требования к электрическим моделям электромеханических систем сетей водоснабжения. Принцип построения электрических моделей электромеханических систем сетей водоснабжения проиллюстрирован на примере насосного агрегата с центробежным насосом, который имеет рабочее колесо с тремя лопастями. Отмечено, что, анализируя электромагнитные процессы в электрической модели, необходимо учитывать величину активного сопротивления контура коммутации, поскольку именно в этом случае полученный результат электрического моделирования будет адекватно отражать рабочий процесс реальной электромеханической системы. Доказано, что электрические модели электромеханических систем сетей водоснабжения не просто совокупность электрических моделей ее энергетических компонент. Элементы электрических моделей электромеханических систем обобщенно учитывают конструктивные, режимные, энергетические и другие характеристики реальных объектов гидравлической сети.

Ключевые слова: электромеханическая система, насос, энергия, водоснабжение, энергоэффективность.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Одним із стратегічних напрямів реформування промислових галузей України, які споживають значні обсяги електричної енергії, є розробка вітчизняного наукоємного енергоефективного електротехнічного обладнання. Тому підвищення енергоефективності електромеханічних систем (ЕМС) розгалужених мереж водопостачання є актуальною та важливою науково-прикладною проблемою, оскільки для транспортування й регулювання гідропотоків у таких мережах споживаються великі обсяги електричної енергії [1].

Іноземні фірми пропонують електронасосне та інше обладнання, рекламуючи його як сучасне та

енергоефективне, але альтернативою таких пропозицій повинно бути підвищення енергоефективності вітчизняного електронасосного обладнання, що неможливо без розвитку теорії аналізу енергетичних процесів в усіх компонентах електромеханічних систем мереж водопостачання [2].

Дослідження показали, що розвиток теорії аналізу взаємопов'язаних енергетичних процесів при багатоканальному регулюванні гідропотоків у розгалужених системах водопостачання може використовувати суто електричні моделі, які здатні враховувати в режимі реального часу взаємний зв'язок енергетичних процесів в окремих компонентах єдиної еле-

ктромеханічної системи, якими є підсистеми підводу рідини, привідний електричний двигун, сам насос разом із вузлами та засобами регулювання гідропотоків.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. У роботі основним енергетичним елементом будь-якої гідравлічної мережі вважається електромеханічна система, яка складається з привідного електричного двигуна, насоса та системи підводу рідини з накопичувальних резервуарів.

У практичному аспекті електромеханічна система є сукупністю декількох окремих об'єктів гідравлічної мережі, призначених забезпечити технологічний процес водопостачання, узгодження взаємодії яких спрямовано на отримання максимальної енергоефективності функціонування мережі водопостачання [3, 4].

Згідно з основною концепцією роботи, дослідити шляхи узгодження взаємодії об'єктів ЕМС найкраще через подання останньої заступною електричною схемою, яка не є механічним поєднанням електричних схем окремих об'єктів гідравлічної мережі. Розроблені авторами електричні моделі ЕМС узагальнено враховують конструктивні особливості окремих об'єктів гідравлічної мережі, основні нюанси робочого процесу [5], накладання енергетичних потоків та низку перетворень: частоти, кількості фаз, одного виду енергії на інший.

Викладене формулює вимоги до електричних моделей окремих елементів гідравлічної мережі водопостачання, сукупність яких дозволяє побудувати електротехнічний комплекс, адекватний гідравлічній мережі. Однак для вирішення цієї проблеми необхідно розробити електричну модель електромеханічної системи.

За конструктивною схемою ЕМС, які досліджуються в роботі, робоче колесо відцентрового насоса розташовується на валу, що має спільну вісь із віссю валу привідного електричного двигуна. Вал насоса з'єднується з валом електродвигуна. Енергія від останнього передається насосу. За рахунок цієї енергії при обертанні колеса в потоці рідини виникає різниця тисків з обох сторін кожної лопаті й, відповідно, силова взаємодія потоку рідини з лопатевим робочим колесом. Тобто електрична енергія, яку споживає привідний електричний двигун, перетворюється в гідравлічну енергію потоку рідини, що проходить через насос. Прирощення енергії потоку рідини у колесі залежить від швидкості потоку, частоти обертання колеса, його розмірів та форми лопаті. У відповідних каналах корпусу насоса та дифузорі кінетична енергія рідини частково перетворюється в енергію тиску. Залежно від кількості пар полюсів (p) привідного електродвигуна, синхронна швидкість обертання колеса n фіксована та може становити 3000, 1500, 1000, 750 або 600 об/хв. Прирощення енергії одиниці маси рідини, яку перекачує насос, оцінюється збільшенням напору на його виході порівняно з напором на вході. Як і відмічалось раніше, у привідному електродвигуні має

місце перетворення частоти енергетичного процесу за співвідношенням $\omega = \omega_M/p$. Якщо насос працює на закриту напірну засувку, тобто витрати води споживачу немає, напір на його виході найбільший і фактично є напором неробочого ходу (H_0). Зі збільшенням обсягів витрати води напір на виході насоса зменшується, що пояснюється наявністю об'ємних, гідравлічних, механічних та інших втрат у насосі.

Вода, що отримала прискорення в колі проточної частини робочого колеса насоса, через дифузور попадає у зовнішню гідравлічну мережу й надходить споживачу. Тобто мають місце два процеси: «розгін» рідини лопатями робочого колеса в колі проточної частини та «виштовхування» її в зовнішню трубопровідну систему [6]. Відвідна камера відцентрових насосів, робочий процес яких досліджується, може бути більш простої конструкції (з однозавитковим спіральним відводом) чи більш складної – з двозавитковим спіральним відводом. У насосах з однозавитковим спіральним відводом кожна лопать за один оберт робочого колеса один раз проходить повз початок відводу (язик) і переміщує рідину у відвідну камеру через дифузор до напірного трубопроводу, тому кількість таких "виштовхувань" за один оберт робочого колеса дорівнює кількості його лопатей.

Рух рідини по колу в проточній частині насоса математично можна записати гармонічною функцією (синусоїдою) з кутовою частотою ω , яка відповідає швидкості обертання ротора, а рух рідини у напірному трубопроводі є постійним однонаправленим. Хоча, як свідчить практика, цей постійний однонаправлений рух рідини має пульсації, як не є абсолютно постійним у часі і напір на виході з насоса. Таким чином, вихід відцентрового насоса з однозавитковим спіральним відводом, а точніше його початок, є m -фазним випрямлячем, фазність якого дорівнює кількості лопатей (K_L) робочого колеса. Тому електрична модель електромеханічної системи повинна містити $m = K_L$ паралельних віток.

Виходячи з викладеного, блок-схему електричної моделі електромеханічної системи, яка враховує фізичний та енергетичний процес у ній, зображено на рис. 1.

Нехай у склад ЕМС входить відцентровий насос з робочим колесом, яке має три лопаті. Спрощену схему руху рідини в насосі наведено на рис. 2.

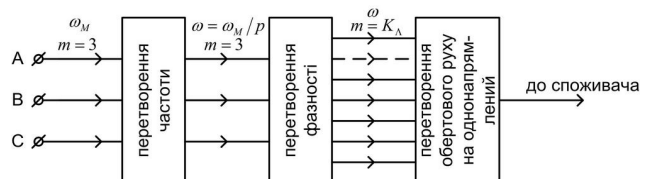


Рисунок 1 – Блок-схема електричної моделі електромеханічної системи

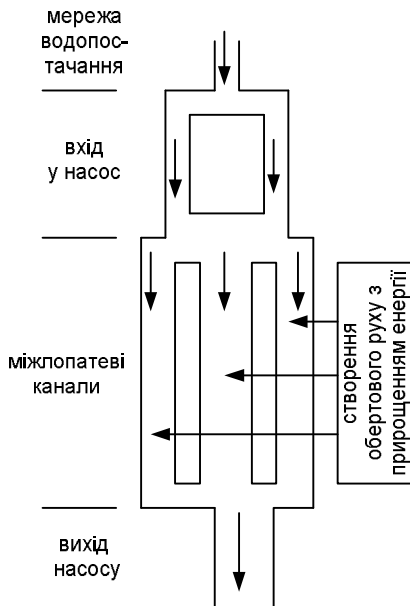


Рисунок 2 – Спрощена схема руху рідини в насосі

Оскільки дослідження роботи та розробки щодо електричного моделювання ЕМС обмежені системами з відцентровими насосами двостороннього входу (типу Д), рідина, яка надходить із мережі водопостачання, на вході насоса розподіляється на два симетричні потоки. Далі зазначені потоки рідини розподіляються в міжлопатевих каналах робочого колеса. На цій стадії проходження рідини відбуваються два визначальні енергетичні перетворення: потік рідини набуває обертового руху з одночасним прирощенням енергії. У подальшому, при виході з проточної частини насоса, рух рідини стає одностороннім спрямованим, тобто місце початку «язика» є своєрідним місцем початку процесу перетворення обертового руху рідини в однонапрямлений.

Тож схему електричної моделі електромеханічної системи з відцентровим насосом, робоче колесо якого має три лопаті, зображено на рис. 3. Згідно з вищевикладеним, вона є трифазною. Кожна фаза містить послідовно з'єднані джерело синусоїдної ЕРС, індуктивність L_T , активний опір R і діод D [7]. Наявність підпору по всмоктуванню моделюється джерелом постійної ЕРС E_{Π} .

Вилучимо із схеми (рис. 3) елемент, який моделює наявність підпору по всмоктуванню E_{Π} . Активний опір R , величина якого враховує рівень загальних втрат енергії в електромеханічній системі, замінимо на R_T , опір, величина якого враховує втрати енергії у міжлопатевому просторі робочого колеса відцентрового насоса. Отриманий при цьому рис. 4 умовно можна вважати схемою електричної моделі відцентрового насоса, який має однозавитковий спіральний відвід і трилопатеве робоче колесо. Насправді ж, точно кажучи, побудувати електричну модель лише відцентрового насоса, окремо від електромеханічної системи, неможливо.

Пояснюється це тим, що насос без привідного електродвигуна не є дієздатним механізмом, як, власне, не є корисним механізмом і електричний двигун, в якого немає навантаження на валу.

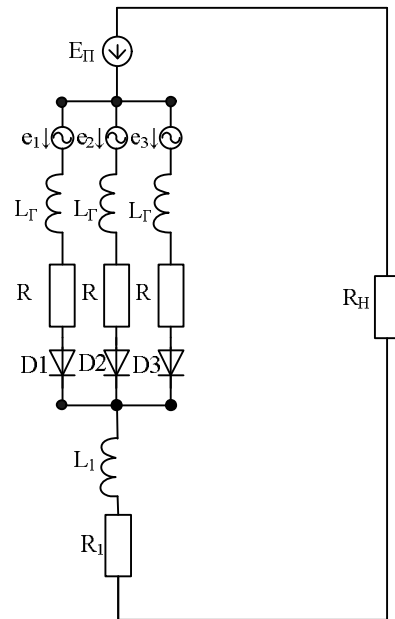


Рисунок 3 – Схема електричної моделі ЕМС ($m = 3$)

Тож у схемі рис. 4, як і у схемі рис. 3, джерела синусоїдної ЕРС $e_j = E_m \sin(\omega t + \psi_j)$ моделюють не електричний двигун, а наявність привідного електричного двигуна в електромеханічній системі. Причому це моделювання враховує як конструктивні особливості привідного електричного двигуна і його робочі характеристики, так і деякі конструктивні особливості насоса.

Пояснимо цю тезу на прикладі. Нехай синхронний привідний електричний двигун живиться від трифазної ($m = 3$) мережі енергопостачання промислової частоти $f_m = 50$ Гц, напругою 6 кВ і має n обертів на хвилину. При цьому насос, приводом якого є зазначений електричний двигун, має робоче колесо з кількістю (K_n) лопатей, однозавитковий спіральний відвід і напір неробочого ходу H_0 метрів. Електрична модель такого насосного агрегату повинна містити (K_n) паралельних віток, джерела синусоїдних ЕРС, які створюють m -фазну систему ($m = K_n$) частотою $f = n/60$ (Гц) зі зсувом за фазою $\psi = 2\pi/m$. Амплітудне значення E_m цих ЕРС (у вольтах) розраховується, виходячи з величини напору неробочого ходу насоса (у метрах), яку потрібно збільшити пропорційно коефіцієнту пульсацій випрямленої напруги електричної моделі. У разі, коли параметри елементів електричної моделі вважаються лінійними, більш точний результат виходить, якщо отримане числове значення амплітуди ЕРС збільшити на (1,5–2,0) % залежно від типу насосного агрегату, який входить у склад електромеханічної системи.

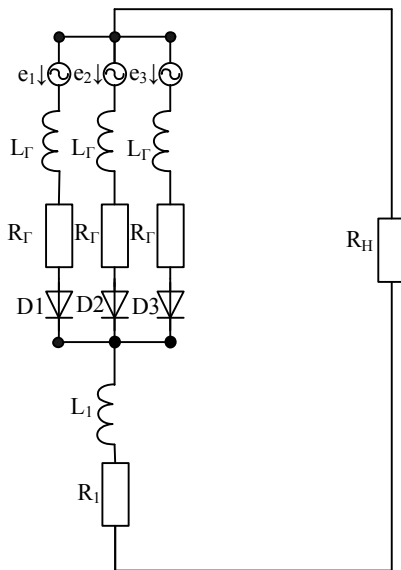


Рисунок 4 – Схема електричної моделі насосного агрегату ($m = 3$)

Тому рис. 4 слід вважати не схемою електричної моделі відцентрового насоса, а схемою електричної моделі насосного агрегату з відцентровим насосом двостороннього входу, що має однозавитковий спіральний відвід та робоче колесо з трьома лопатями.

У загальному випадку для моделі електромеханічної системи з відцентровим насосом, робоче колесо якого має ($m = K_n$) лопатей, система ЕРС паралельних віток електричної моделі узагальнено запишеться у вигляді гармонічної функції (синусоїди) наступним чином:

$$e_j = E_m \sin \left[\omega t + \pi \left(0,5 + \frac{1-2j}{m} \right) \right], \quad (1)$$

де j – номер вітки електричної моделі.

Цим у моделі відображається факт обертового руху рідини в проточній частині насоса [8].

Кожна синусоїдна ЕРС має однакову кутову частоту ω , яка дорівнює кутовій частоті обертання ротора насоса, а не кутовій частоті напруги мережі електропостачання.

Зсув за фазою синусоїдних ЕРС окремих віток електричної моделі складає

$$\psi_j = \pi \left(0,5 + \frac{1-2j}{m} \right). \quad (2)$$

Для відцентрового насоса з $m = 3$ кут зсуву за фазою між ЕРС сусідніх віток складає 120° , що дорівнює $1/3$ періоду 360° . Те ж саме маємо й у насосі. Якщо робоче колесо має три лопаті, то вони зсунені між собою за периметром робочого колеса також на його $1/3$ частину.

Напір неробочого ходу насоса H_0 є основною величиною, через яку розраховується амплітуда E_m синусоїдних ЕРС. Величина напору неробочого ходу насоса залежить від розміру зовнішнього діаметра його робочого колеса [9]. Тож і ця важлива

конструктивна характеристика відцентрового насоса враховується в його електричній моделі.

Наведена на рис. 4 схема фактично є відомою схемою трифазного випрямляча із середньою точкою. У схемі немає трансформатора, оскільки насосний агрегат у своїй конструкції не містить елемента, який можна змоделювати трансформатором. Однак факт передачі енергії насоса від привідного електричного двигуна моделюється джерелами синусоїдної ЕРС, розташованими в кожній фазі електричної моделі. Відповідно до того, як лопаті зсунені між собою на третину периметра робочого колеса, ЕРС фаз мають між собою зсув за фазою на третину періода, тобто джерелом живлення електричної моделі є симетрична система трифазних напруг прямого чергування фаз:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= E_m \sin(\vartheta + \pi / 6); \\ e_2 &= E_m \sin(\vartheta - \pi / 2); \\ e_3 &= E_m \sin(\vartheta + 5\pi / 6). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі електричної енергії, реалізованому за зазначеною схемою, здійснено давно й досить ґрунтовно. Однак наведемо деякі дані, які знадобляться в подальшому розгляді процесів як у схемі рис. 4, так і в схемах інших перетворювачів, що застосовуються як складові електричних моделей електромеханічних систем.

Аналіз процесів руху рідини в насосних агрегатах вказує на наявність як активних опорів, обумовлених втратами енергії, так і індуктивних, обумовлених інерційними процесами. Причому, як показують дослідження, в міжлопатевому каналі робочого колеса відцентрового насоса інерційна складова опору менша за активну. Тому, на відміну від аналізу електромагнітних процесів у пристроях енергетичної електроніки, де зазвичай нехтують активним опором контуру комутації, враховуючи лише його індуктивний опір, при аналізі процесів у електричній моделі ЕМС враховувати наявність активного опору контуру комутації потрібно обов'язково [10].

Якщо активним опором і індуктивністю фаз електричної моделі відцентрового насоса знехтувати ($R_\Gamma = 0$; $L_\Gamma = 0$), матимемо випадок ідеалізованого режиму роботи, за яким кожний діод схеми вступає в роботу один раз за період і проводить струм протягом його третини. Перехід струму з попереднього діода на наступний здійснюється миттєво в моменті часу, які відповідають точкам перетину синусоїд фазної напруги. Звідси випливає, що крива випрямленої напруги u_d є огинаючою синусоїд фазної напруги джерел ЕРС схеми електричної моделі й має три пульсації за період.

Якщо при аналізі електромагнітного процесу у схемі рис. 4 враховувати наявність активних опорів фаз ($R_\Gamma \neq 0$, $L_\Gamma = 0$), ситуація буде іншою, що підтверджує наступний аналіз.

Розрахуємо схему рис. 4 за методом вузлової напруги з урахуванням, що навіть за відсутністю у схемі індуктивностей діоди сусідніх фаз деякий час працюють спільно. За зазначених умов момент вступу діода в роботу невідомий.

Виходячи з методу вузлової напруги, співвідношення, за яким змінюється випрямлена напруга перетворювача у випадку спільної роботи діодів D1 і D3 (рис. 4), запишеться як

$$\dot{U}_{d(1)} = \frac{\dot{E}_1 / R_T + \dot{E}_3 / R_T}{1 / R_T + 1 / R_H + 1 / R_T} = \frac{-\dot{E}_2}{2 + R_T / R_H}. \quad (4)$$

При цьому отримаємо вирази струмів діодів D1 і D3 у комплексній формі:

$$\dot{I}_{(1)} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_d}{R_T} = \frac{\dot{E}_1}{R_T} + \frac{\dot{E}_2}{R_T(2 + R_T / R_H)}; \quad (5)$$

$$\dot{I}_{(3)} = \frac{\dot{E}_3 - \dot{U}_d}{R_T} = \frac{\dot{E}_3}{R_T} + \frac{\dot{E}_2}{R_T(2 + R_T / R_H)}. \quad (6)$$

Як зазначалося вище, момент вступу в роботу діода D1 невідомий, однак його можна розрахувати з умови, що в момент вступу його в роботу $i_{(1)} = 0$. Перетворимо вираз (5) і розглянемо його з урахуванням вищевикладеного:

$$\dot{I}_{(1)} = \frac{\dot{E}_1(2 + R_T / R_H) + \dot{E}_2}{R_T(2 + R_T / R_H)}. \quad (7)$$

Струм дорівнюватиме нулю, якщо вираз його чисельника дорівнюватиме нулю, тож для миттєвих значень отримаємо

$$E_m \sin(\vartheta + 30^\circ) [2 + R_T / R_H] = -E_m \sin(\vartheta - 90^\circ)$$

або

$$(2 + R_T / R_H) \sin(\vartheta + 30^\circ) = \sin(\vartheta + 90^\circ).$$

Останнє є трансцендентним рівнянням, з якого розраховується момент початку комутації діода D1 і період спільної роботи сусідніх діодів:

$$\frac{\sin(\vartheta + 90^\circ)}{\sin(\vartheta + 30^\circ)} = 2 + R_T / R_H. \quad (8)$$

З виразу (8) випливає:

а) за умови $R_T = 0$ рівність забезпечується при $\vartheta = 0$, тобто комутація є миттєвою й збігається з моментом перетину фазних синусоїд e_1 та e_3 ;

б) за умови $R_T \neq 0$ зсув початку вступу діода в роботу ψ_n , а також і період спільної роботи сусідніх діодів залежить від співвідношення R_T/R_H .

Наприклад, якщо $R_T/R_H = 0,2$, то розрахунок за виразом (8) дає значення $\psi_n = -3^\circ$, тобто діод вступає в роботу на $\vartheta = 3^\circ$ раніше моменту миттєвої комутації. При $R_T/R_H = 1,0$ ($\psi_n = -10,8^\circ$) випереджаючий зсув моменту вступу в роботу діода D1 відносно моменту миттєвої комутації збільшується до $\vartheta = 10,8^\circ$. Залежність кута $\psi_n = f(R_T/R_H)$ наведено на рис. 5.

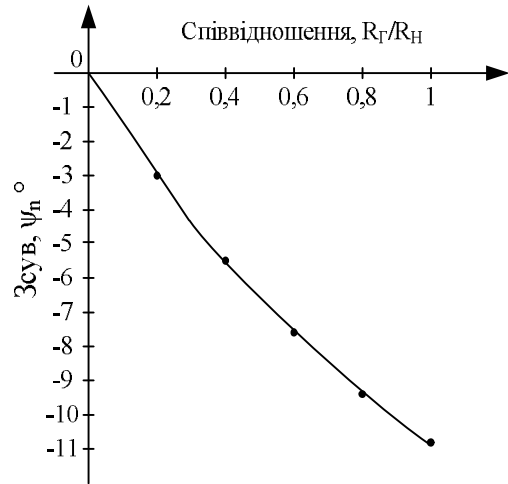


Рисунок 5 – Графік залежності кута ψ_n від співвідношення R_T/R_H

Період спільної роботи сусідніх діодів удвічі більший за розрахований вище зсув початку їх вступу в роботу. Це підтверджується й виразом (6), що описує закономірність зміни струму діода D3, величина якого в момент припинення спільної роботи діодів дорівнює нулю. Розглядаючи (6) у зазначеному контексті, отримаємо

$$\dot{E}_3(2 + R_T / R_H) + \dot{E}_2 = 0$$

чи для миттєвих значень

$$(2 + R_T / R_H) \sin(\vartheta + 150^\circ) = \sin(\vartheta + 90^\circ).$$

Останнє також є трансцендентним рівнянням, з якого розраховується момент припинення струму діода D3:

$$\frac{\sin(\vartheta + 90^\circ)}{\sin(\vartheta + 150^\circ)} = 2 + R_T / R_H. \quad (9)$$

Якщо $R_T/R_H = 0,2$, то розрахунок за виразом (9) дає $\psi_k = 3^\circ$, тобто $|\psi_n| = |\psi_k|$.

З урахуванням викладеного, співвідношення (4)–(6) справедливі для діапазону спільної роботи двох сусідніх діодів, коли $\psi_n \leq \vartheta \leq \psi_k$.

У момент $\vartheta = \psi_k$ спільна робота діодів D1 і D3 припиняється і в роботі залишається лише діод D1. З рівняння, складеного для схеми рис. 4 по контуру, що проходить через першу вітку і опір навантаження, отримаємо

$$e_1 = i_{(1)} R_T + i_{(1)} R_H,$$

або

$$i_{(1)} = \frac{e_1}{R_T + R_H}. \quad (10)$$

Співвідношення (10) справедливе для інтервалу $\psi_k \leq \vartheta \leq (2\pi/3 + \psi_n)$. На вказаному інтервалі миттєве значення випрямленої напруги запишеться як

$$U_{d(2)} = \frac{e_1}{1 + R_T / R_H}. \quad (11)$$

Побудуємо криві випрямленої напруги, випрямленого струму та струмів діодів для режиму роботи, який характеризується наступними числовими даними: $E_m = 120 \text{ В}$; $R_F = 30 \text{ Ом}$; $R_L = 0 \text{ Ом}$; $R_H = 50 \text{ Ом}$.

За наведених даних відношення $R_F/R_H = 0,6$. При цьому $\psi_n = -7,6^\circ$.

Розрахуємо дані для побудови кривих: $u_d(\vartheta)$; $i_d(\vartheta)$; $i_1(\vartheta)$; $i_2(\vartheta)$; $i_3(\vartheta)$.

Таблиця 1 – Розрахункові дані для побудови кривих $u_{d(1)}(\vartheta)$; $i_{d(1)}(\vartheta)$

ϑ	$-7,6^0$	-5^0	$-2,5^0$	0^0	$2,5^0$	5^0	$7,6^0$
$U_{d(1)}(\text{В})$	45,75	45,99	46,11	46,15	46,11	45,99	45,75
$i_{d(1)}(\text{А})$	0,915	0,920	0,922	0,923	0,922	0,920	0,915

Таблиця 2 – Розрахункові дані для побудови кривих $u_{d(2)}(\vartheta)$; $i_{d(2)}(\vartheta)$

ϑ	$7,6^0$	30^0	60^0	90^0	$112,4^0$
$U_{d(2)}(\text{В})$	45,75	64,95	75,00	64,95	45,75
$i_{d(2)}(\text{А})$	0,915	1,30	1,50	1,30	0,915

Таблиця 3 – Розрахункові дані для побудови кривих $i_{(1)}(\vartheta)$; $i_{(3)}(\vartheta)$

ϑ	$-7,6^0$	-5^0	$-2,5^0$	0^0	$2,5^0$	5^0	$7,6^0$
$i_{(1)}(\text{В})$	0	0,15	0,31	0,46	0,61	0,76	0,91
$i_{(3)}(\text{А})$	0,91	0,76	0,61	0,46	0,31	0,15	0

Побудовані за даними табл. 1–3 криві основних характеристик електромагнітного процесу (наведені для половини періоду) зображено на рис. 6.

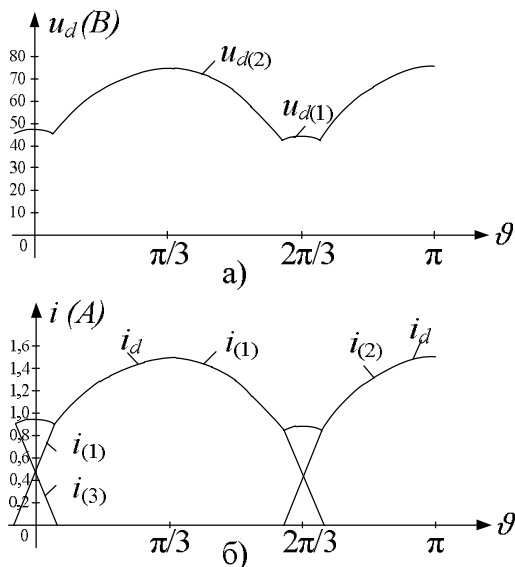


Рисунок 6 – Основні криві електромагнітного процесу за розрахунком: а) випрямлена напруга u_d ; б) випрямлений струм i_d та струм діодів $i_{(1)}$, $i_{(2)}$

Схему електричної моделі насосного агрегату ($m = 3$), реалізовану в системі схемотехнічного моделювання Мікро-Сар 9 [11], наведено на рис. 7, а деякі результати моделювання – на рис. 8.

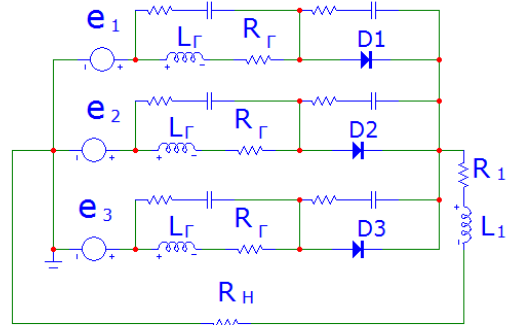


Рисунок 7 – Схема електричної моделі насосного агрегату ($m = 3$) у системі схемотехнічного моделювання

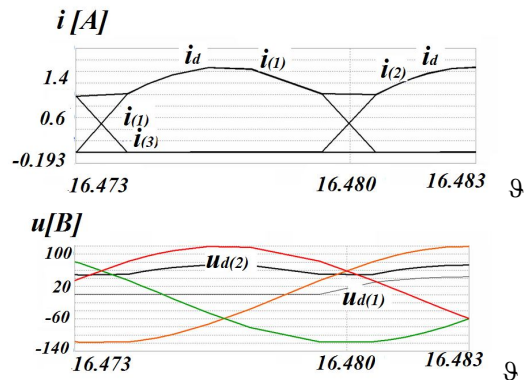


Рисунок 8 – Основні криві електромагнітного процесу за результатами схемотехнічного моделювання

Звернімо увагу, що параметри елементів електричної моделі такі ж, як і при аналітичному розрахунку, результати якого наведені вище: амплітудне значення синусоїдних джерел ЕРС складає $E_m = 120 \text{ В}$; їх зсув за фазою відповідає співвідношенням (3); активний опір віток $R_F = 30 \text{ Ом}$; усі індуктивні елементи мають нульову індуктивність; опір навантаження $R_H = 50 \text{ Ом}$.

Порівнявши результати схемотехнічного моделювання з результатами аналітичного розрахунку, доходимо висновку щодо адекватності електричного моделювання, оскільки їх результати практично збігаються з результатами аналітичного розрахунку. Деяке розходження в (1–2) % пояснюється тим, що при аналітичному розрахунку діод вважається ідеальним ключем, а у схемотехнічній моделі він задається реальною характеристикою.

ВИСНОВКИ. 1. Застосований у роботі аналіз робочих процесів у електромеханічних системах мереж водопостачання, подаючи їх сукупністю окремих складових, взаємодія яких полягає в

багатоетапному перетворенні енергії, дозволив сформулювати стратегію створення електричних моделей ЕМС.

2. Електричні моделі електромеханічних систем мережі водопостачання не є простою сукупністю електричних моделей її енергетичних компонент. Елементи електричних моделей ЕМС узагальнено враховують конструктивні, режимні, енергетичні й інші характеристики реальних об'єктів гідравлічної мережі, до яких максимально наближені параметри елементів електричних моделей.

3. Електричні моделі пасивних елементів гідравлічних мереж водопостачання (ділянок водоводів, засувки і т.ін.) відомі. Створення авторами електричних моделей електромеханічних систем гідравлічних мереж є підґрунтям реалізації наукового підходу, згідно з яким будь-яку мережу водопостачання можна змоделювати електротехнічним комплексом.

4. Схемотехнічне моделювання електромагнітних процесів у електричних моделях електромеханічних систем мереж водопостачання, наведене в роботі, може поширюватись і на аналіз процесів у електричних моделях електротехнічних комплексів. Причому сучасні засоби обчислювальної техніки дозволяють моделювати як усталені процеси, так і перехідні та аварійні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Промышленность Украины: путь к энергетической эффективности // ЕС – Energy Centre Kiev. – 1995. – 198 с.

2. Бойко В.С., Сотник М.І., Хованський С.О. Узагальнена оцінка економічності системи водопостачання // Технічна електродинаміка. Темат. вип.

«Силовая электроника та енергоефективність». – 2009. – Част. 3. – С. 46–51.

3. Стоимость жизненного цикла насоса (LCC): руководство по анализу LCC насосных систем. – М.: Изд-во ООО «СофтКом», 2010. – 220 с.

4. Сотник М.І., Бойко В.С., Юрченко М.М. Визначення ефективності експлуатації електромеханічних агрегатів // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Вип. 2/2013 (22). – С. 226–232.

5. Сотник М.І., Бойко В.С. Електромагнітний процес в електричній моделі відцентрового насоса // Науковий вісник НГУ. – 2014. – Вип. 3. – С. 91–98.

6. Гликман Б.Ф. Нестационарные течения в пневмогидравлических цепях. – М.: Машиностроение, 1979. – 256 с.

7. Трудоношин В.А., Пивоварова Н.В. Системы автоматизированного проектирования: в 9-ти кн. Кн. 4. Математические модели технических объектов: учеб. пособие для вузов / Под ред. И.П. Норенкова. – М.: Высшая школа, 1986. – 160 с.

8. Регулирование частоты вращения насосного оборудования. Руководство для успешного применения. – М.: Изд-во ООО «СофтКом», 2011. – 200 с.

9. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. – М.: Наука, 1987. – 366 с.

10. Шидловский А.К., Липковский К.А., Щерба А.А., Бойко В.С. Обеспечение энергоэффективности электротехнических и электротехнологических комплексов средствами силовой электроники // Техническая электродинамика. Спец. выпуск № 2. – Т. 1. – 1998. – С. 5–12.

11. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap 6. – М.: Горячая линия–Телеком, 2001. – 344 с.

ENERGY PROCESSES IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WATER SUPPLY NETWORK AND ITS ELECTRIC MODEL

M. Sotnik

Sumi State University

vul. Rimskoho-Korsakova, 2, Sumy, 40007, Ukraine. E-mail: nsotnik@mail.ru

V. Boiko

National Technical University of Ukraine “Kyiv Politechnic Institute”

prosp. Peremohi, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: vsboiko@bigmir.net

Authors formulated requirements to the electric models of electromechanical systems of water supply networks considering electromechanical system of water supply network as the multi-stage converter of energy, having analysed stages of its transformation on the frequency, quantity of phases, a type of energy and imposing of power streams, considering also features of physical process of liquid movement in the pump. The principle of creation of electric models of electromechanical systems of water supply networks on the example of the pump unit with the centrifugal pump which has the driving wheel with three blades is illustrated. It is accented that while analyzing electromagnetic processes in electric model it is necessary to consider the size of active resistance of a contour of switching because just in this case the received result of electric modeling will adequately reflect working process of real electromechanical system. It is proved that electric models of electromechanical systems of water supply networks are not simply set of electric models of its power components. Elements of electric models of electromechanical systems generally consider constructive, regime, power and other characteristics of real objects of a hydraulic network.

Key words: electromechanical system, pump, energy, water supply, energy efficiency.

REFERENCES

1. EC – Energy Centre Kiev (1995), *Promyshlennost Ukrainy: put k energeticheskoy effektivnosti* [Industry of Ukraine: the path to energy efficiency], EC – Energy Centre Kiev, Ukraine. (in Russian)
2. Boiko, V.S., Sotnyk, M.I. and Khovanskyi, S.O. (2009), "The generalized assessment of profitability of water supply system", *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vyputsk "Sylova elektronika ta energoefektyvnist"*, Vol. 3, pp. 46–51. (in Ukrainian)
3. *Stoimost zhiznennogo tsikla nasosa (LCC): rukovodstvo po analizu LCC nasosnyh sistem* [Life-cycle cost (LCC): Guide to LCC Analysis pumping systems] (2010), ООО "SoftKom", Moscow. (in Russian)
4. Sotnyk, M.I., Boiko, V.S. and Yurchenko, M.M. (2013), "Determination of efficiency of operation of electromechanical units", *Electrotekhnichny i energzberigayuchi sistemi, shchokvartalnyi naukovovyrobnychiy zhurnal*, Vol. 2, no. 22, pp. 226–232. (in Ukrainian)
5. Sotnyk, M.I. and Boiko, V.S. (2014), "Electromagnetic process in electric model of the centrifugal pump", *Naukovyi Visnik NGU, Scientific Bulletin of National Mining University*, No. 3, pp. 91–98. (in Ukrainian)
6. Glikman, B.F. (1979), *Nestatsionarnye techeniya v pnevmogidravlicheskih tsepyah* [Unsteady flow in pneumatic and hydraulic circuits], Mashinostroenie, Moscow. (in Russian)
7. Trudonoshin, V.A. and Pivovarova, N.V. (1986), *Matematicheskie modeli tehnikeskikh obyektov, ucheb. posobie dlya vtuzov* [Mathematical models of technical objects], Vol. 1–9, no. 4, Vysshaya shkola, Moscow. (in Russian)
8. Hydraulic Institute and Europamp, (2011), *Regulirovanie chastoty vrascheniya nasosnogo oborudovaniya. Rukovodstvo dlya uspeshnogo primeneniya* [Control of rotation speed of the pump equipment. Guidelines for successful application], ООО "SoftKom", Moscow. (in Russian)
9. Glikman, B.F. (1987), *Matematicheskie modeli pnevmo-gidravlicheskih sistem* [Mathematical models of pneumatic and hydraulic systems], Nauka, Moscow. (in Russian)
10. Shidlovskiy, A.K., Lipkovskiy, K.A., Shherba, A.A. and Boyko, V.S. (1998), "Providing energy efficiency of electrical and electro-technological systems by means of power electronics", *Tekhnicheskaya elektrodynamika*, Vol. 1, 2, pp. 5–12. (in Russian)
11. Razevig, V.D. (2001), *Sistema shemotehnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap* [The system of Micro-Cap circuit simulation], Goryachaya liniya–Telekom, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 24.10.2015.