

ISSN 1607-7970
E-ISSN 2218-1903

ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ • ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ
ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ
ТА УСТАНОВКИ

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ
В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

№5

2013

ЗМІСТ

До 80-РІЧЧЯ академіка НАН України Шидловського Анатолія Корнійовича.....	3
Теоретична електротехніка та електрофізика	
СУПРУНОВСКАЯ Н.И., ИВАЩЕНКО Д.С. Многоуровневая модель взаимозависимых переходных процессов в цепях электроразрядных установок со стохастической нагрузкой	5
Перетворення параметрів електричної енергії	
ШИДЛОВСКАЯ Н.А., РУДЕНКО Ю.В. Применение теории дифференциальных уравнений с импульсным воздействием к анализу процессов в импульсных преобразователях напряжения.....	14
ГУСЕВ О.О. Визначення параметрів регулятора в системі керування DC/DC перетворювачем з квазі-імпедансною ланкою за умови стійкості для малого сигналу	18
Електромеханічне перетворення енергії	
PERESADA S., KOVBASA S., PRYSTUPA D., LYSHEVSKI S.E. Adaptive Control of Stator Currents for Self-Commissioning of Induction Motor Drives	24
ЗАГИРНЯК М.В., ПРУС В.В., НЕВЗЛИН Б.И. Оценка электрических машин и их серий с использованием функциональных зависимостей параметров от обобщенного линейного размера	32
ВИШТАК Т.В., КАРЛОВ А.Н., КОНДРАТЕНКО И.П., РАЩЕПКИН А.П. Магнитное поле токов статорной обмотки синхронного двигателя с полым ротором.....	41
МИЛЫХ В.И., ПОЛЯКОВА Н.В. Силовые взаимодействия в турбогенераторе в различных стационарных режимах работы	47
Електроенергетичні системи та устаткування	
КИРИЛЕНКО О.В., БЛІНОВ І.В., ПАРУС Є.В. Оцінка роботи електростанцій при наданні допоміжних послуг з первинного та вторинного регулювання частоти в ОЕС України	55
ЖАРКИН А.Ф., ПОПОВ В.А., ТКАЧЕНКО В.В. Решение задачи оптимального секционирования воздушных распределительных сетей в условиях нормирования показателей надежности	61
ЖУРАХІВСЬКИЙ А.В., КЕНС Ю.А., ЯЦЕЙКО А.Я., МАСЛЯК Р.Я. Захист електричних мереж 6–35 кВ від ферорезонансних процесів.....	70
Електротехнологічні установки	
ГЛУХЕНЬКИЙ А.И., ГОРИСЛАВЕЦ Ю.М., ТОКАРЕВСКИЙ А.В. Трехмерное моделирование однофазного электромагнитного перемешивателя жидких металлов	77
БЛАГА О.В., БОЖКО І.В. Дослідження генерації озону в імпульсному бар'єрному розряді.....	85
БОЙКО В.С., СОТНИК М.І. Адекватність електричного моделювання робочих процесів у відцентрованому насосі	90
ДО 70-РІЧЧЯ члена-кореспондента НАН України О.І.ТИТКА	96

CONTENTS

TO THE 80TH ANNIVERSARY of Member of NAS Ukraine A.K.SHYDLOVSKYI3

Theoretical electrical engineering and electrophysics

SUPRUNOVSKA N.I., IVASHCHENKO D.S. Multilevel Model of Interdependent Transients in Circuits of Electrodischarge Installations with Stochastic Load5

Conversion of electric energy parameters

SHYDLOVSKA N.A., RUDENKO Yu.V. Application of Differential Equations Theory with Impulse Excitation for Processes Analysis at Pulse Voltage Converters 14

HUSEV O.O. Determining of the Controller Parameters of the QZS DC/DC Converter Control System Providing Small Signal Stability 18

Electromechanical energy conversion

PERESADA S., KOVBASA S., PRYSTUPA D., LYSHEVSKI S.E. Adaptive Control of Stator Currents for Self-Commissioning of Induction Motor Drives24

ZAGIRNYAK M., PRUS V., NEVZLIN B. Estimation of Electric Machines and Their Series Using Parameter Functional Dependences on the Generalized Linear Size32

VISHTAK T.V., KARLOV A.N., KONDRATENKO I.P., RASHCHEPKIN A.P. Magnetic Field of Currents Winding Stator of the Synchronous Motor with Hollow Rotor41

MILYKH V.I., POLIAKOVA N.V. The Force Interactions in Turbogenerator in Different Steadystate Working Conditions47

Electric power systems and installations

KYRYLENKO O.V., BLINOV I.V., PARUS E.V. Operation Evaluation of Power Plants in the Provision of Ancillary Services of Primary and Secondary Frequency Control in the Ukrainian Power System55

ZHARKIN A.F., POPOV V.A., TKACHENKO V.V. Solution of the Overhead Distribution Networks Optimal Sectionalizing Problem under the Condition of Reliability Indices Standardization61

ZHURAHIVSKYI A.V., KENS Yu.A., YATSEYKO A.Ya., MASLIAK R.Yu. Multi-Protection System Power Grids 6-35kv from Ferroresonance Processes70

Electrotechnological systems

GLUKHENKYI O.I., GORYSLAVETS Yu.M., TOKAREVSKYI A.V. Three-Dimensional Simulation of Single-Phase Electromagnetic Stirrer of Liquid Metal77

BLAGA O.V., BOZHKO I.V. Research Ozone Generation in Pulsed Barrier Discharge85

BOIKO V.S., SOTNYK M.I. Adequacy of Electrical Simulation Workflows in a Centrifugal Pump90

TO THE 70TH ANNIVERSARY of Corresponding Member of NAS Ukraine O.I.TYTKO96

Науковий редактор К.О.ЛИПКІВСЬКИЙ

Редактор Т.І. МАЙБОРОДА

Художній редактор П.В.БЕККЕР

Друкується згідно з рекомендацією Вченої ради Інституту електродинаміки НАН України, протокол № 9 від 25.07.2013 р. Підписано до друку 28.08.2013. Формат 60x84/8. Пап. друк. офс. Офсет. Ум.-друк. арк. 11,7. Тираж 300 прим. Зам. 82. Зареєстровано 20.01.94. Свідоцтво: серія КВ, № 388. Ціна договірна.

Поліграфічна дільниця Інституту електродинаміки НАН України 03680, м.Київ-57, пр. Перемоги, 56.

АДЕКВАТНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДЦЕНТРОВОМУ НАСОСІ

¹ В.С.Бойко, докт.техн.наук, ²М.І.Сотник, канд.техн.наук

¹Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: VSBoiko@bigmir.net

²Сумський державний університет,
ул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна. E-mail: nsotnik@mail.ru

Наведено результати дослідження електромагнітних процесів у електричній моделі шестилопатевого відцентрового насоса з однозавитковим спіральним відводом, на основі яких побудована зовнішня харак-теристика моделі. Її порівняльний аналіз зі стандартною Q-H характеристикою пристрою, що моделюється, дозволяє авторам дійти висновку щодо доцільності такого моделювання, його адекватності реальним робочим процесам та можливості практичного застосування з метою підвищення енергоефективності системи водопостачання. Бібл. 3, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: енергоефективність, адекватність, модель, комутація, електромагнітний процес.

Вступ. Практично у кожному технологічному процесі таких галузей, як енергетика, хімічна, гірничорудна, металургійна промисловості, а також у фармацевтичній та харчовій промисловостях для водопостачання і водовідведення використовуються відцентрові насоси. Вони є одним з найпоширеніших класів лопатевих гідравлічних машин. За різними експертними оцінками ними споживається близько 20% всього об'єму електричної енергії, що виробляється у світі, а у деяких галузях господарства ця частка становить 25...50% загальних витрат [1]. Зазначені обсяги також відображають і структуру енергоспоживання у галузях господарства України. Скорочення об'єму енергоспоживання насосним обладнанням є нагальною потребою, зважаючи на зростаючі ціни енергоносіїв, прагнення підприємств до економії енергоресурсів, підвищення ефективності та оптимізації використання інвестиційного ресурсу.

Оцінювання технічного рівня (з точки зору використання енергії у робочому процесі) насосних агрегатів проводиться за показником коефіцієнта їхньої корисної дії (паспортний ККД) у робочому (оптимальному) режимі.

Дослідження та висновки спеціалістів показують, що у випадках, коли насоси експлуатуються у системах зі змінним у часі гідравлічним опором, вони лише від 10% до 25% часу працюють з параметрами, що відповідають оптимальному (паспортному) ККД [2].

При роботі насосів за межами робочого діапазону їхні Q-H-характеристики, мають місце додаткові втрати енергії, які зумовлені особливостями робочого процесу на таких режимах. Отже високий паспортний ККД насосів може бути знівельований додатковими втратами енергії, що викликані неузгодженістю між витратою насосного агрегату та миттєвою потребою мережі.

Задача підвищення енергоефективності системи водопостачання досить складна. Одним із шляхів її розв'язку є розроблений авторами спосіб електричного моделювання відцентрового насоса [3] та системи водопостачання в цілому. Він є альтернативним відносно існуючих на сьогодні гідравлічних методів аналізу робочих процесів насосних агрегатів, мета яких полягає в отриманні даних щодо причин нераціонального споживання ними електроенергії та визначенню комплексу заходів, реалізація яких дозволить узгодити характеристику насосної станції з характеристиками мережі водопостачання та технологічного споживача. Проведення такого аналізу електротехнічним методом, у якому електрична модель насосного агрегату є ключовим елементом електротехнічної системи, дозволяє отримати більш точний результат, швидше і не тільки в усталеному, а у випадку необхідності і в перехідному режимі.

Мета роботи. Довести адекватність застосування електричного моделювання робочих процесів відцентрового насоса через аналіз електромагнітних процесів у заступній схемі насосного агрегату.

Результати досліджень. Дослідження проведено на прикладі насоса Д 2000-100, конструкцію якого показано на рис. 1. Насос складається з корпусу, робочого колеса з шістьма лопатями, входу (системи всмоктування) та виходу, яким є дифузорний відвід і система водоводів. Насос має однозавитковий спіральний відвід. Схему електричної моделі такого насоса показано на рис. 2.



Рис. 1

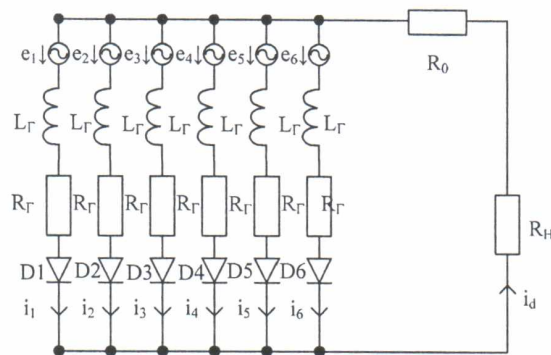


Рис. 2

Електрична модель відцентрового насоса складається з m паралельних віток (за кількістю лопатей робочого колеса). Кожна вітка містить послідовно з'єднані джерело синусоїдної ЕРС $e = E_m \sin(\omega t + \Psi)$, гідравлічний активний опір R_Γ , гідравлічну індуктивність L_Γ , діод D . Втрати енергії у відводі моделюються опором R_0 , а опір R_H узагальнює наявність системи водоводів та споживача.

Оскільки схемою рис. 2 моделюється шестилопатевий відцентровий насос, то вона містить шість паралельних віток, ЕРС яких мають однакову амплітуду та частоту і зміщені одна відносно одної на шосту частину періоду, що у дослідженні відображено наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= E_m \sin(\nu + \pi/3); & e_2 &= E_m \sin \nu; & e_3 &= E_m \sin(\nu - \pi/3); \\ e_4 &= E_m \sin(\nu - 2\pi/3); & e_5 &= E_m \sin(\nu - \pi); & e_6 &= E_m \sin(\nu - 4\pi/3), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $\nu = \omega t$ – змінна, в якій виконуються усі розрахунки.

Аналогом робочого процесу у насосі є електромагнітний процес у його електричній схемі, яка за своєю сутністю є однокатним шестипульсним випрямлячем, кожний діод якого вступає в роботу один раз за період i , якщо знехтувати індуктивністю віток моделі, проводить струм протягом шостої частини періоду, тобто $\pi/3$. Якщо ж досліджувати електромагнітний процес електричної схеми відцентрового насоса з урахуванням параметрів усіх її елементів, то він є значно складнішим і полягає у наступному.

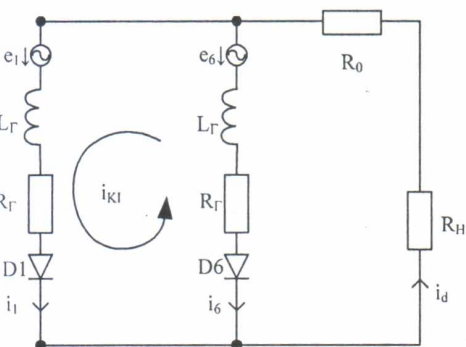


Рис. 3

Виходячи зі значення початкової фази ЕРС окремих віток електричної схеми (1), початком відліку часу $\nu = 0$ є початок електромагнітного процесу при переході струму з вентиля D_6 на вентиль D_1 . У контурі, який складається з першої і шостої віток, виникає струм комутації i_{kl} , напрям якого показано на рис. 3.

Запишемо рівняння для контуру комутації на I етап комутаційного процесу

$$e_1 - e_6 = x_\gamma di_{kl} / dv + R_\Gamma i_1 + u_{D1} - u_{D6} - R_\Gamma i_6 - x_\gamma di_6 / dv, \quad (2)$$

де $x_\gamma = \omega L_\Gamma$ – індуктивний опір вітки.

Врахуємо, що напруга на працюючих вентилях практично дорівнює нулю ($u_{D1} = u_{D6} \approx 0$), тому у подальшому аналізі ця складова напруги не враховується. Струм діода D_1 , який входить в роботу, є струмом комутації ($i_{1(1)} = i_{kl}$), а струм діода D_6 , що виходить з роботи, розраховується як $i_6 = I_{dk} - i_{kl}$, де I_{dk} – значення випрямленого струму в момент закінчення комутації. Виходячи з викладеного, рівняння (2) можна переписати наступним чином:

$$e_2 = 2x_\gamma di_{kl} / dv + 2R_\Gamma i_{kl} - R_\Gamma I_{dk} - x_\gamma dI_{dk} / dv.$$

Тут враховано, що $e_1 - e_6 = e_2 = E_m \sin \nu$. Якщо врахувати також, що величина I_{dk} є сталою і похідна від неї дорівнює нулю, а другий і третій доданки правої частини останнього рівняння малі за величиною і мають протилежний знак, остаточно запишемо рівнянням комутації досліджуваного однокатного шестипульсного випрямляча

$$E_m \sin \nu = 2x_\gamma di_{kl} / dv. \quad (3)$$

з якого випливає, що

$$di_{KI} = (E_m / 2x_\gamma) \sin v dv, \quad \text{або} \quad i_{KI} = (E_m / 2x_\gamma)(1 - \cos v). \quad (4)$$

За таким законом змінюється струм $i_{1(1)}$ діода D1 на першому інтервалі, який є і першим етапом комутації i_{KI} .

У момент часу $v = \gamma$ режим одночасної роботи діодів D1 і D6 закінчується. Діод D6 закривається, а у роботі залишається лише діод D1. Починається другий інтервал струму $i_{1(2)}$ діода D1 протяжністю $\gamma \leq v \leq \pi/3$. Контур для складання рівняння при розрахунку закономірності зміни струму $i_{1(2)}$ зображено на рис. 4. Рівняння, складене за другим законом Кірхгофа, має вигляд

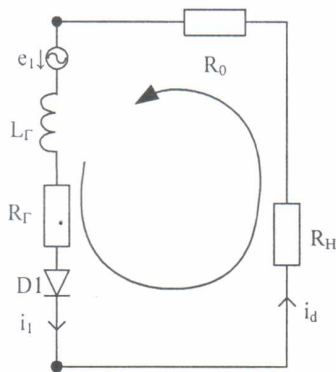


Рис. 4

$$e_1 = x_\gamma di_{1(2)} / dv + R_\Gamma i_{1(2)} + i_{1(2)} R_H + i_{1(2)} R_0.$$

Оскільки напругою на працюючому вентилі, як і раніше, нехтуємо, то

$$E_m \sin(v + \pi/3) = x_\gamma di_{1(2)} / dv + R_e i_{1(2)}, \quad (5)$$

де $R_e = R_\Gamma + R_H + R_0$. Це неоднорідне диференціальне рівняння, розв'язок якого класичним методом отримаємо у вигляді вимушеної і вільної складових: $i_{1(2)} = i'_{1(2)} + i''_{1(2)}$.

Вимушена складова струму діода D1 у комплексній формі

$$i'_{m1(2)} = \dot{E}_m / Z = E_m e^{j\frac{\pi}{3}} / Z e^{j\varphi} = I'_m e^{j(\frac{\pi}{3} - \varphi)}, \quad \text{де } Z = \sqrt{R_e^2 + x_\gamma^2} - \text{повний опір контуру; } \varphi = \arctg(x_\gamma / R_e) - \text{кут зсуву за фазою.}$$

Характеристичне рівняння однорідного диференціального $pL_\Gamma + R_e = 0$, де $p = -R_e / L_\Gamma$.

Таким чином, закон зміни струму діода D1 у позакомутаційному інтервалі часу (другий інтервал) у загальному вигляді запишеться так

$$i_{1(2)} = E_m Z^{-1} \sin(v + \pi/3 - \varphi) + A e^{-\frac{R_e}{x_\gamma}(v-\gamma)}. \quad (6)$$

де A – стала інтегрування.

Зауважимо, що на цьому інтервалі часу $i_{1(2)} = i_d$ – випрямленому струму.

Другий інтервал закінчується у момент часу $v = \pi/3$, коли в роботу вступає діод D2. Починається другий етап комутаційного процесу, на якому струм проводять діоди D2 і D1.

Для отримання закономірності зміни струму $i_{1(3)}$ діода D1 на третьому інтервалі (при виході його з роботи) розглянемо схему на рис. 3. Рівняння (2) для контуру комутації цієї схеми доповнимо ще двома рівняннями, одне з яких складене за першим законом Кірхгофа, а інше – за другим

$$i_1 + i_6 = i_d; \quad (7)$$

$$e_1 = x_\gamma di_1 / dv + R_\Gamma i_1 + i_d (R_H + R_0), \quad (8)$$

і розв'яжемо їх разом. Врахувавши, що $i_6 = i_d - i_1$, рівняння (2) запишемо так

$$e_1 - e_6 = x_\gamma di_1 / dv + 2R_\Gamma i_1 - x_\gamma di_d / dv - (R_H + R_0) i_d. \quad (9)$$

З виразу (8) випливає, що $x_\gamma di_1 / dv + R_\Gamma i_1 = e_1 - (R_H + R_0) i_d$. Підставимо це в (9) і остаточно отримаємо диференціальне рівняння першої степені

$$e_6 + e_1 = x_\gamma di_d / dv + (2R_H + R_\Gamma + 2R_0) i_d,$$

розв'язок якого дасть закономірність зміни струму навантаження i_d (випрямленого струму) в інтервалі часу $0 \leq v \leq \gamma$

$$i_d = \sqrt{3} E_m (Z')^{-1} \sin(v + \pi/2 - \varphi') + B e^{-\frac{(2R_H + R_\Gamma + 2R_0)v}{x_\gamma}}, \quad (10)$$

де $Z' = \sqrt{(2R_H + R_\Gamma + 2R_0)^2 + x_\gamma^2}$; $\varphi' = \arctg[x_\gamma (2R_H + R_\Gamma + 2R_0)^{-1}]$; $R_e' = 2R_H + R_\Gamma + 2R_0$.

Віднявши від (10) закономірність зміни струму діода D1 на першому етапі комутації за співвідношенням (4), отримаємо закон зміни струму діода D6 при виході його з роботи, що і є закономірністю зміни струму комутації i_{KI} на другому етапі

$$i_{KI} = \sqrt{3}E_m(Z')^{-1} \sin(\nu + \pi/2 - \phi') + Be^{-\frac{R_e}{x_\gamma}\nu} - (E_m/2x_\gamma)(1 + \cos \nu). \quad (11)$$

Сталі інтегрування A та B , які входять у вирази (6), (10) і (11), розрахуємо, виходячи з умов сполучення зазначених співвідношень між собою та з іншими виразами на межі окремих інтервалів. Так, для моменту часу $\nu = \gamma$ струм i_{KI} за виразом (4) дорівнює струму $i_{1(2)}$ за виразом (6)

$$(E_m/2x_\gamma)(1 - \cos \gamma) = (E_m/Z) \sin(\gamma + \pi/3 - \phi) + A,$$

звідки

$$A = (E_m/2x_\gamma)(1 - \cos \gamma) - (E_m/Z) \sin(\gamma + \pi/3 - \phi). \quad (12)$$

Тож закон зміни струму діода D1 на II інтервалі $i_{K(2)}$ запишемо таким чином:

$$i_{1(2)} = (E_m/Z) \sin(\nu + \frac{\pi}{3} - \phi) + \left[(E_m/2x_\gamma)(1 - \cos \gamma) - (E_m/Z) \sin(\gamma + \frac{\pi}{3} - \phi) \right] e^{-\frac{R_e}{x_\gamma}(\nu - \gamma)}. \quad (13)$$

Вираз (13) справедливий для інтервалу часу $\gamma \leq \nu \leq \pi/3$, тобто при $\nu = \pi/3$ він закінчується і значення струму $i_{1(2)}$ у цей момент дорівнює

$$i_{1(2)} \Big|_{\nu = \frac{\pi}{3}} = (E_m/Z) \sin(\frac{2\pi}{3} - \phi) + \left[(E_m/2x_\gamma)(1 - \cos \gamma) - (E_m/Z) \sin(\gamma + \frac{\pi}{3} - \phi) \right] e^{-\frac{R_e}{x_\gamma}(\frac{\pi}{3} - \gamma)}. \quad (14)$$

Цьому значенню дорівнює величина струму i_d за виразом (10), розрахована у момент часу $\nu = 0$, тобто $(\sqrt{3}E_m/Z') \sin(\pi/2 - \phi') + B = i_{1(2)} \Big|_{\nu = \frac{\pi}{3}}$, звідки отримаємо сталу інтегрування B

$$B = \frac{E_m}{Z} \sin(\frac{2\pi}{3} - \phi) - \frac{E_m}{Z'} \sin(\frac{\pi}{2} - \phi') + \left[\frac{E_m}{2x_\gamma}(1 - \cos \gamma) - \frac{E_m}{Z} \sin(\gamma + \frac{\pi}{3} - \phi) \right] e^{-\frac{R_e}{x_\gamma}(\frac{\pi}{3} - \gamma)}. \quad (15)$$

Звернімо увагу, що у вирази (12)-(15) входить величина кута комутації γ . Для його розрахунку скористаємось наступними міркуваннями. Оскільки закономірності зміни струмів діодів і навантаження не мають стрибків і розривів, таким же властивостям відповідають і криві індуктивної напруги (комутаційної напруги) у колі комутації. Виходячи з цього

$$\frac{di_{KI}}{d\nu} \Big|_{\nu = \gamma} = \frac{di_{1(2)}}{d\nu} \Big|_{\nu = \gamma} \quad \text{або} \quad \frac{E_m}{2x_\gamma} \sin \gamma = \frac{E_m}{Z} \cos(\gamma + \frac{\pi}{3} - \phi) - \frac{R_e}{2x_\gamma} \left[\frac{E_m}{2x_\gamma}(1 - \cos \gamma) - \frac{E_m}{Z} \sin(\gamma + \frac{\pi}{3} - \phi) \right].$$

Виконавши деякі математичні перетворення, отримаємо трансцендентне рівняння для розрахунку величини кута комутації γ у вигляді

$$\cos \gamma + \left(2 \sin(\gamma + \frac{\pi}{3} - \phi) - \sin \gamma \right) \lambda^{-1} + 2\lambda^{-2} \cos(\gamma + \frac{\pi}{3} - \phi) = 1, \quad (16)$$

де $\lambda = R_e/x_\gamma$; $\phi = \arctg(1/\lambda)$.

Маючи закономірності зміни струму діода на першому та другому інтервалах за виразами (4) і (13), отримаємо співвідношення для побудови кривої випрямленої напруги, яка також має два інтервали. На першому інтервалі протяжністю $0 \leq \nu \leq \gamma$ миттєве значення випрямленої напруги запишеться наступним чином:

$$u_{d(1)} = e_1 - x_\gamma di_{1(1)}/d\nu - R_\Gamma i_{1(1)}. \quad (17)$$

Другий інтервал має протяжність $\gamma \leq \nu \leq \pi/3$ і наступну закономірність зміни миттєвого значення випрямленої напруги

$$u_{d(2)} = e_1 - (R_\Gamma + R_0) i_{1(2)}. \quad (18)$$

Врахувавши вирази (4) і (13) та виконавши деякі математичні перетворення, отримаємо остаточні вирази миттєвого значення випрямленої напруги на окремих інтервалах

$$u_{d(1)} = 0.866E_m \sin(\nu + \pi/3) - R_\Gamma E_m (1 - \cos \nu) / 2x_\gamma; \quad (19)$$

$$u_{d(2)} = E_m \sin(\nu + \pi/3) - (R_\Gamma + R_0) E_m \sin(\nu + \pi/3 - \phi) / Z - (R_\Gamma + R_0) A e^{-R_e(\nu - \gamma)/x_\gamma}.$$

Нижче наведено вираз середнього значення випрямленої напруги, отриманий за відомим математичним співвідношенням

$$U_d = 3\{-0.866E_m \cos(\pi/2 + \gamma) - R_r E_m (\gamma - \sin \gamma) / x_\gamma + 0.5E_m + E_m \cos(\pi/3 + \gamma) + (R_r + R_0)E_m [\cos(2\pi/3 - \varphi) - \cos(\gamma + \pi/3 - \varphi)] / Z + A(R_r + R_0)x_\gamma [e^{-\frac{R_e}{x_\gamma}(\frac{\pi}{3} - \gamma)} - 1] / R_e\} / \pi. \quad (20)$$

Миттєве значення випрямленого струму у роботі подається виразом (10) зі сталою інтегрування B на першому інтервалі та виразом (13) – на другому. Відповідно співвідношення для розрахунку середнього значення випрямленого струму є таким

$$I_d = 3\{\sqrt{3}E_m [\cos(\pi/2 - \varphi') - \cos(\pi/2 + \gamma - \varphi')] / Z' + E_m [\cos(\pi/3 + \gamma - \varphi) - \cos(2\pi/3 - \varphi)] / Z + Bx_\gamma [1 - e^{-\frac{R_e}{x_\gamma} \gamma}] / R_e' + Ax_\gamma [1 - e^{-\frac{R_e}{x_\gamma}(\frac{\pi}{3} - \gamma)}] / R_e\} / \pi. \quad (21)$$

Два останні співвідношення разом з виразами (12) і (15) для розрахунку сталих інтегрування та трансцендентне рівняння (16) використані для розрахунку та побудови зовнішньої характеристики електричної моделі відцентрового насоса.

Оскільки, як зазначалося раніше, доведення адекватності електричного моделювання робочих процесів у відцентровому насосі буде здійснено стосовно насоса Д 2000-100, саме його технічні характеристики використані при моделюванні. Напір на виході насоса $H=100$ м має місце при обсязі подачі рідини $2000 \text{ м}^3/\text{год}$. Зазначимо, що величина напору (в метрах) на виході насоса у будь-якому режимі його роботи має дорівнювати напрузі (у вольтах) на виході електричної моделі. Струм моделі (в амперах) має дорівнювати подачі насоса в метрах кубічних (м^3) за секунду, відповідно $2000 \text{ м}^3/\text{год}$ є $0,5555 \text{ м}^3/\text{с}$. Якщо зазначений насос має робоче колесо діаметром 820 мм і укомплектований приводним асинхронним електричним двигуном зі швидкістю обертання 980 об/хв , то це, згідно з розробленим авторами способом електричного моделювання відцентрового насоса [3], відповідає наступним параметрам елементів електричної моделі: $E_m=117 \text{ В}$, $R_r=8 \text{ Ом}$, $R_0=4 \text{ Ом}$, $L_r=0.1 \text{ Гн}$, $f=980/60=16.333 \text{ Гц}$, $x_\gamma=10.26 \text{ Ом}$. Наведені вище дані використані для розрахунку зовнішньої характеристики електричної моделі відцентрового насоса Д 2000-100, результати якого представлені у табл. 1.

Таблиця 1

$R_{\text{н}}(\text{Ом})$	∞	4637	2049	1135	719	493	355	267	206	163	131
γ	0	5^0	7.5^0	10^0	2.5^0	15^0	17.5^0	20^0	22.5^0	25^0	25.5^0
$U_d(\text{В})$	111.7	111.3	110.8	110.1	109.2	108.2	106.9	105.5	103.9	102.2	101.4
$I_d(\text{А})$	0	0.024	0.053	0.113	0.152	0.220	0.302	0.396	0.506	0.631	0.660
$Q(\text{м}^3/\text{Г})$	0	85	191	406	547	792	1087	1426	1822	2272	2400

Оскільки усі елементи електричної моделі відцентрового насоса є лінійними, то й зовнішня характеристика моделі є прямою, що показано на рис. 5. На тому ж рисунку зображена і стандартна $Q-H$ характеристика насоса Д 2000-100, побудована за даними, наведеними у табл. 2.

Таблиця 2

$H(\text{м})$	113	113	112.6	111.7	111	109.2	107.7	105.5	101.5	94.0	91.2
$Q(\text{м}^3/\text{год})$	0	85	191	406	547	792	1087	1426	1822	2272	2400

Порівняльний аналіз двох характеристик – зовнішньої (вольт-амперної) електричної моделі і стандартної ($Q-H$) відцентрового насоса – засвідчує, що вони є досить близькими навіть за умови, що перша відповідає лінійному пристрою, а друга – нелінійному. Найбільша розбіжність значень вихідних характеристик відцентрового насоса і його електричної моделі має місце у режимах перевантаження і, як випливає з наведених вище даних, при перевантаженні на 10% дорівнює 5%, при перевантаженні на 20% (подача насоса $2400 \text{ м}^3/\text{год}$) досягає майже 10%. При номінальному навантаженні похибка моделювання складає близько 3%, що є досить прийнятним.

Висновки. 1. Проведені дослідження підтверджують можливість моделювання робочих процесів відцентрових насосів розробленим авторами способом електричного моделювання. При моделюванні робочого процесу відцентрового насоса лінійною електричною моделлю при навантаженнях $(0.6-1.1)Q_{\text{ном}}$ похибка моделювання не перевищує 5%.

2. Підвищення точності електричного моделювання робочого процесу відцентрового насоса можливе за рахунок введення нелінійності елементів електричної моделі, що реально за умови використання пакетів схемотехнічного моделювання електричних та електронних схем.

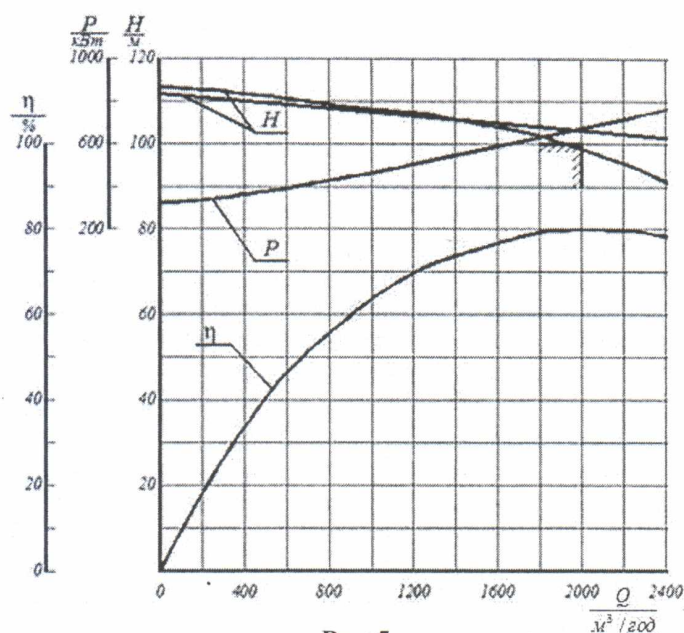


Рис. 5

3. Оскільки побудова зовнішньої характеристики ґрунтується на узагальненому аналізі електромагнітних процесів у електричній моделі відцентрового насоса та відповідності основних показників технологічного процесу об'єкта і його моделі, мету наукового дослідження, представленого у публікації, можна вважати досягнутою, тобто адекватність результатів електричного моделювання та робочих процесів у відцентровому насосі доведена.

4. Використання електричної моделі відцентрового насоса як основної ланки електричної моделі системи водопостачання є ефективним засобом швидкого та високоточного аналізу особливостей робочого процесу для досягнення максимальної енергоефективності технологічного процесу за рахунок узгодження характеристик усіх елементів системи.

1. Неня В.Г., Хованський С.О. Оцінка втрат енергії, пов'язаних з нестационарною роботою відцентрового насоса // Вісник НТУ «ХПІ». – 2010. – №44. – С.25 – 29.

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

3. Спосіб створення електричної моделі відцентрового насоса: Патент UA № 67781, МПК G06G 7/00 / Бойко В.С., Бойко В.В., Сотник М.І. - у 2011 08267 // Промислова власність. – 2012. – № 5.

УДК 621.314

АДЕКВАТНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ

¹В.С.Бойко, докт. техн. наук, ²Н.И.Сотник, канд. техн. наук

¹Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" пр. Перемоги, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: VSBoiko@bigmir.net

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

Приводятся результаты исследования электромагнитных процессов в электрической модели шестилопастного центробежного насоса с однозавитковым спиральным отводом, на основе которых построена внешняя характеристика модели. Ее сравнительный анализ со стандартной Q-H-характеристикой моделируемого устройства позволяет авторам сделать вывод относительно целесообразности такого моделирования, его адекватности реальным рабочим процессам и возможности практического применения с целью повышения энергоэффективности системы водоснабжения. Библ. 3, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: энергоэффективность, адекватность, модель, коммутация, электромагнитный процесс.

ADEQUACY OF ELECTRICAL SIMULATION WORKFLOWS IN A CENTRIFUGAL PUMP

¹V.S.Boiko, ²M.I.Sotnyk

¹National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" pr. Peremohy 37, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: VSBoiko@bigmir.net

²Sumy State University Rims'kogo-Korsakova st.,2, Sumy, 40007, Ukraine. E-mail: nsotnik@mail.ru

The article presents the results of study of electromagnetic processes in the electrical model of centrifugal pump with six blades with single-turn volute outlet. External characteristic of this model was constructed on the basis of these results. Comparative analysis of his constructed external characteristic with Q-H characteristic of the pump, which is modeled, allows the authors to conclude about the feasibility of simulation and its adequacy to real workflows and possibility of practical application to improve the water supply system's efficiency. References 3, tables 2, figures 5.

Key words: energy efficiency, adequacy of models, switching, electromagnetic process.

1. Nenia V.H., Khovanskyi S.O. Assessment of energy expenditure associated with unsteady work of centrifugal pump Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universitetu "KhPI". – 2010. – №44. – Pp. 25–29. (Ukr)

2. Pump life cycle costs: a guide to LCC analysis for pumping systems. – Moskva: ООО "SoftCom", 2010. – 220 p. (Rus)

3. Method of creating electrical model of centrifugal pump: patent UA № 67781, МПК G06G 7/00 / Boiko V.S., Boiko V., Sotnyk M.I. - u 2011 08267. // Promyslova Vlasnist. – 2012. – № 5.

Надійшла 22.01.2013

Received 22.01.2013