

щена суцільна лінія) найточніше наближається до дійсного результату порівняно із кривими (рис. 7, криві 2 і 3), отриманими іншими відомими методами.

Висновки. Показано, що моделі відмов на основі спрощених канонічних фазових розподілів, є зручними для опису явища перерозподілу навантаження, оскільки потребують, подібно експоненціальній моделі відмов, зміни лише одного параметра. Запропоновано розширену однорідну Марковську модель надійності на основі розширення простору стану для системи із однократним заміщувальним полегшеним резервуванням. Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що запропонована модель здатна адекватніше порівняно із відомими моделями, такими як звичайна однорідна Марковська модель та аналітична модель на основі інтегральних рівнянь, описати безвідмовність об'єкта.

Подальші дослідження скеровані на розробку моделі надійності на основі методу Монте-Карло, яка буде використана для перевірки отриманого в цій статті результату, а також для розрахунку показників готовності відновлюваних систем з перерозподілом навантаження.

1. Dugan, J.B., Yong Ou Approximate sensitivity analysis for acyclic Markov reliability models // *IEEE Transactions on Reliability*. – 2003. – Vol. 52, No. 2. – P. 220–230. 2. Platis A.N., Limnios N.E., Le Du M. Asymptotic availability of systems modeled by cyclic non-homogeneous Markov chains // *Proc. Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1997 – St. Louis, USA. – 1997. – P. 293–297. 3. Zhang, X., Gockenbach, E. Assessment of the Actual Condition of the Electrical Components in Medium-Voltage Networks // *IEEE Transactions on Reliability*. – 2006. – Vol. 55, No. 2. – P. 361–368. 4. John B. Bowles, Commentary – Caution: Constant Failure-Rate Models May Be Hazardous to Your Design// *IEEE Transactions on Reliability*. – 2002. – Vol. 51, No.3. – P. 375–377. 5. Райнике К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов / Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с. 6. Лозинський О.Ю., Щербовських С.В. Визначення ефективної підмножини фазових законів розподілу для утворення математичних моделей надійності ремонтів об'єктів // *Відбір і обробка інформації*. – 2004. – № 21(97). – С. 17–22. 7. Лозинський О.Ю., Щербовських С.В. Побудова моделей надійності ремонтів електромеханічних об'єктів на основі розширення простору станів // *Вісн. НТУ “Харківський політехнічний інститут”*. – 2005. – № 45. – С. 74–81.

УДК 62-83:621.313.3

А.В. Маляр

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра ЕАП

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНИХ СТРУМІВ У ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШТАНГОВИХ НАФТОВИДОБУВНИХ УСТАНОВОК

© Маляр А.В., 2007

Запропоновано метод визначення закону зміни ємності конденсаторів у пускових режимах асинхронного електропривода штангової нафтовидобувної установки, який дає змогу зменшити до мінімального значення струму в лінії, яка живить установку.

A method of determining variation law of capacitor capacity in the starting modes of the asynchronous drive of a rod oil-pumping unit, which allows reducing the current in the power line to the minimum value, is proposed.

Вступ. Для видобування нафти за допомогою штангових глибинних pomp використовуються установки, в яких привідним двигуном є асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором [1–3]. Навантаження таких двигунів зумовлене особливістю роботи верстатів-гойдалок, які

приводять в рух зв'язану з плунжером помпи колоу штанг. Характерним для нього є важкі умови пуску та циклічно-змінний характер. Крім того, момент навантаження під час пуску має стохастичний характер і може коливатись у значних межах. Тому для забезпечення успішного запуску використовують двигуни з підвищеним пусковим моментом [1]. Вони мають глибокі пази або подвійну клітку на роторі. У той самий час для аналізу роботи електропривода штангових нафтовидобувних установок (ШНВУ) використовують [5] заступні схеми АД, що не дає змоги отримати достовірні результати і вимагає натурних досліджень.

Одним із недоліків АД є споживання необхідної для створення магнітного поля реактивної потужності. У режимі відсутності навантаження на валу двигуна реактивний намагнічувальний струм становить 20–50 % від номінального значення, а в номінальному режимі коефіцієнт потужності знаходиться в межах від 0,7 до 0,9. Реактивна потужність не бере участі в перетворенні енергії, однак завантажує як двигун, так і електромережу реактивним струмом, зумовлюючи втрати енергії в елементах електроенергетичної системи. Прямий пуск АД супроводжується значними пусковими струмами, величина яких може досягати восьмикратного значення порівняно з номінальним. Це призводить до провалів напруги в лінії, яка живить установку, значних втрат електроенергії в ній, а також впливає на роботу інших споживачів і комутаційної апаратури. Крім того, це обмежує кількість двигунів, які можна одночасно запускати. Ситуація погіршується тим, що ШНВУ мають велику інерційну масу рухомих частин, що робить процес пуску затяжним, оскільки на зміну кінетичної енергії механічної частини витрачається значна кількість електроенергії.

Суть проблеми. Під час пуску АД величина струму визначається переважно його реакивною складовою, а одним із способів компенсації реактивної потужності є застосування конденсаторів, вибір ємності яких для роботи в динамічних режимах є важливим і відповідальним завданням. Ця проблема особливо актуальна для малodeбітних свердловин [3], які працюють у режимі частих зупинень (і відповідно пусків) ШНВУ для відновлення рівня рідини в свердловині.

Завдання компенсації реактивної потужності в системі електропостачання можна розв'язати вмиканням паралельно до статорних обмоток кожного двигуна конденсаторів, величину ємності яких вибирають з умови компенсації реактивної потужності АД в номінальному режимі, або вмиканням на загальні шини живлення групи установок батареї конденсаторів, величину ємності яких змінюють залежно від сумарної кількості увімкнених двигунів.

Відомі схеми електропостачання дають змогу досягнути балансу реактивної потужності тільки в усталених режимах з незмінним у часі навантаженням [4]. У перехідних режимах, як правило, існує дефіцит реактивної потужності, який зумовлений різницею між індуктивною складовою струму АД і ємнісним струмом батареї конденсаторів. Зокрема, розрахована на компенсацію реактивних струмів двигуна при індивідуальній компенсації в номінальному режимі величина ємності конденсаторів, недостатня для такої компенсації пускових реактивних струмів. При централізованій системі компенсації ця проблема ще більше ускладнюється, тому що процес має стохастичний характер, можна запускати одночасно два і більше двигунів. Крім того, керування вмиканням і вимиканням конденсаторів здійснюється автоматично за одним або двома параметрами, які характеризують роботу системи електропостачання, що пов'язано з інерційністю систем автоматики, яка формує керуючі впливи, а також затримкою оброблення інформації.

Мета статті. Запропоновано метод розрахунку величини ємності конденсаторів та закону її зміни в пускових режимах електропривода ШНВУ з урахуванням витіснення струму та насичення магнітопроводу АД, а також змінного моменту інерції та навантаження, який дає змогу мінімізувати струм у лінії електропостачання.

Суть методу полягає ось у чому. Беручи до уваги, що електромагнітні перехідні процеси в контурах АД спадають майже до нуля протягом перших кількох періодів зміни напруги живлення, а ШНВУ характеризується значною інерцією рухомих частин, тривалість перехідного процесу визначає механічна постійна часу, яка може становити в ШНВУ десятки секунд. Отже, процес пуску, за винятком перших кількох періодів, можна розглядати як сукупність квазіперіодичних

процесів, оскільки на кожному періоді зміни напруги живлення струми обмоток є майже періодичними. Отже, для кожного квазіперіодичного процесу можна визначити величину ємності конденсаторів, яка забезпечує практично повну компенсацію споживаної двигуном реактивної потужності.

Для отримання закону зміни величини ємності батареї конденсаторів під час пуску необхідно розрахувати багатовимірну залежність вектора $\vec{I}$ значень струмів контурів від ковзання

$$\vec{I} = \vec{I}(s), \quad (1)$$

обчислених з певним кроком по s . Її отримання вимагає попереднього розрахунку з урахуванням насичення магнітопроводу АД і витіснення струму в його стрижнях ряду (за кількістю значень s) усталених періодичних режимів при постійному значенні ковзання. Розглянемо алгоритм їх отримання.

Оскільки АД, які приводять в рух ШНВУ, мають глибокопазний ротор або з подвійною кліткою, то достовірність результатів розрахунку пускових режимів, залежить значною мірою від коректності врахування явища витіснення струму в стрижнях короткозамкненого ротора. У математичній моделі АД з метою врахування скін-ефекту в стрижнях ротора разом з насиченням магнітопроводу на шляхах розсіювання пазову частину стрижня, а також короткозамикаючі кільця ротора розділено по висоті на n шарів [8], в межах яких густина струму вважається постійною. У результаті отримуємо на роторі n короткозамкнених обмоток, між якими існують взаєміндуктивні зв'язки як за рахунок основного магнітного потоку, так і потоків розсіювання. Короткозамкнена обмотка ротора приводиться за кількістю витків і фаз до обмотки статора. При цьому приймається допущення про синусний розподіл намагнічувальних сил обмоток статора і ротора.

Період зміни навантаження ШНВУ визначається необхідною для експлуатації цієї свердловини кількістю циклів роботи плунжерної помпи за одну хвилину. Зазвичай верстат-гойдалка здійснює 5–15 гойдань за хвилину, тобто відношення періоду зміни моменту навантаження на валу АД до періоду зміни напруги живлення становить від 100 до 300, а отже, розглядати електромагнітні процеси в фазних координатах надто складно, а значить недоцільно. Враховуючи, що розглядається симетричний АД, процеси з достатньою точністю можна аналізувати в системі координатних осей x, y [7], яка обертається синхронно з полем машини. Застосування кординатних осей x, y дає змогу описати процеси мінімальною кількістю рівнянь без істотної втрати точності розрахунків у симетричних режимах роботи.

Рівняння електромагнітної рівноваги контурів АД з короткозамкненим ротором у системі координатних осей x, y при постійній швидкості обертання ротора зводяться до нелінійних алгебричних. З урахуванням розбиття кожного стрижня на n елементарних ці рівняння в матрично-векторній формі мають вигляд

$$\vec{u} - \Omega \vec{\psi} - R \vec{i} = 0, \quad (2)$$

де $\vec{\psi} = (\psi_{sx}, \psi_{sy}, \psi_{rx1}, \psi_{ry1}, \dots, \psi_{rxn}, \psi_{ryn})^T$; $\vec{i} = (i_{sx}, i_{sy}, i_{rx1}, i_{ry1}, \dots, i_{rxn}, i_{ryn})^T$; $\vec{u} = (u_{sx}, u_{sy}, 0, \dots, 0)^T$;

$R = \text{diag}(r_s, r_1, \dots, r_n)$ – вектори потокозчеплень, струмів та напруг та діагональна матриця активних опорів контурів (вехній індекс “т” означає транспонування);

$$\Omega = \begin{array}{c|cccccc} & -\omega_0 & & & \dots & & \\ \hline \omega_0 & & & & \dots & & \\ & & & -s\omega_0 & \dots & & \\ \hline & & s\omega_0 & & \dots & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & \dots & & -s\omega_0 \\ & & & & \dots & s\omega_0 & \end{array}$$

– квадратна матриця порядку $2(1+n)$, в якій $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ – ковзання, ω_0, ω – кутові швидкості обертання магнітного поля та ротора, виражені в електричних радіанах за секунду.

Система (2) – нелінійна внаслідок нелінійної залежності поточкозчеплень контурів від струмів. Її можна розв'язати одним із ітераційних методів, внаслідок чого отримаємо одну точку пускової характеристики. Для розрахунку залежностей координат режиму від ковзання застосуємо метод диференціювання по параметру. Для цього систему (2) диференціюємо по ковзанню s . У результаті отримаємо векторне диференціальне рівняння

$$\left(\Omega_0 \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial \vec{i}} + R \right) \frac{d\vec{i}}{ds} = \Omega_0 \vec{\psi}, \quad (3)$$

де

$$\Omega_0 = \begin{bmatrix} & & & & \cdots & & \\ & & & & \cdots & & \\ & & & -\omega_0 & \cdots & & \\ & & \omega_0 & & \cdots & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & \cdots & & -\omega_0 \\ & & & & \cdots & \omega_0 & \end{bmatrix}.$$

Похідна $L = \partial \vec{\psi} / \partial \vec{i}$ – квадратна матриця диференціальних індуктивностей перетворених осей x, y контурів АД, які обчислюються за викладеним у [7].

Інтегруючи векторне диференціальне рівняння (3) одним із числових методів по s в межах від $s=0$ до $s=1$, отримаємо багатовимірну залежність (1). Для визначення часових похідних струмів необхідно на кожному крокові інтегрування розв'язувати систему рівнянь $2(n+1)$ -го порядку.

Оскільки при $s=0$ струми в контурах ротора дорівнюють нулю, для визначення струмів контурів статора, які є початковими умовами під час розв'язування задачі Коші для системи (3), необхідно розв'язати нелінійну систему, яка за умови суміщення осі x із зображуючим вектором напруги має вигляд

$$-\omega_0 \psi_{sy} + R_s i_{sx} = U_m; \quad \omega_0 \psi_{sx} + R_s i_{sy} = 0, \quad (4)$$

де U_m – амплітуда фазної напруги живлення.

Для кожного значення ковзання s споживана двигуном реактивна потужність визначається за формулою

$$Q_o = 1,5(u_y i_x - u_x i_y) = -1,5 U_m i_y. \quad (5)$$

Свою чергою реактивна потужність конденсаторів, необхідних для компенсації потужності (5), буде

$$Q_c = 3\omega_0 C(u_x^2 + u_y^2) / 2 = 3\omega_0 C U_m^2 / 2. \quad (6)$$

Прирівнюючи (5) і (6), визначаємо ємність конденсаторів, необхідних для компенсації реактивної потужності АД при заданому значенні ковзання s , за формулою

$$C = \frac{u_y i_x - u_x i_y}{\omega_0 (u_x^2 + u_y^2)} = -\frac{i_y}{\omega_0 U_m}. \quad (7)$$

Під час числового інтегрування системи (3) по s відповідно до викладеного вище отримаємо залежності струмів від ковзання, і на їх підставі знаходимо залежність ємності конденсаторів від ковзання

$$C = C(s). \quad (8)$$

Перехідний електромеханічний процес електропривода ШНВУ описується системою, яка складається з векторного диференціального рівняння електромагнітної рівноваги контурів АД

$$\frac{d\vec{\psi}}{dt} + \Omega \vec{\psi} + R \vec{i} = \vec{u} \quad (9)$$

та рівняння руху ротора, яке зобразимо у вигляді

$$M_{\partial} = M_e - M_H, \quad (10)$$

де M_{∂} – динамічний момент установки приведений до вала двигуна; $M_e = 1,5p(\psi_{1x}i_{1y} - \psi_{1y}i_{1x})$ – електромагнітний момент двигуна (p – кількість пар полюсів), M_H – момент навантаження, який є періодичною функцією часу і залежить від кута α повороту кривошипа. Залежність $M_H = M_H(\alpha)$ відома як механічна характеристика механізму. Її задають, як правило, у табличному вигляді.

Динамічний момент ШНВУ, враховуючи змінний момент інерції J , має дві складові [6], одна з яких зумовлена зміною кутової швидкості обертання ротора, а друга – кінетичної енергії системи внаслідок зміни моменту інерції під час обертання кривошипа

$$M_{\partial}(t) = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2p} \frac{dJ}{dt}. \quad (11)$$

Перехід від похідної моменту інерції J системи електропривода по часу t до похідної по кутові α повороту кривошипа здійснюється за формулою

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{\omega}{k_i p} \frac{dJ}{d\alpha}. \quad (12)$$

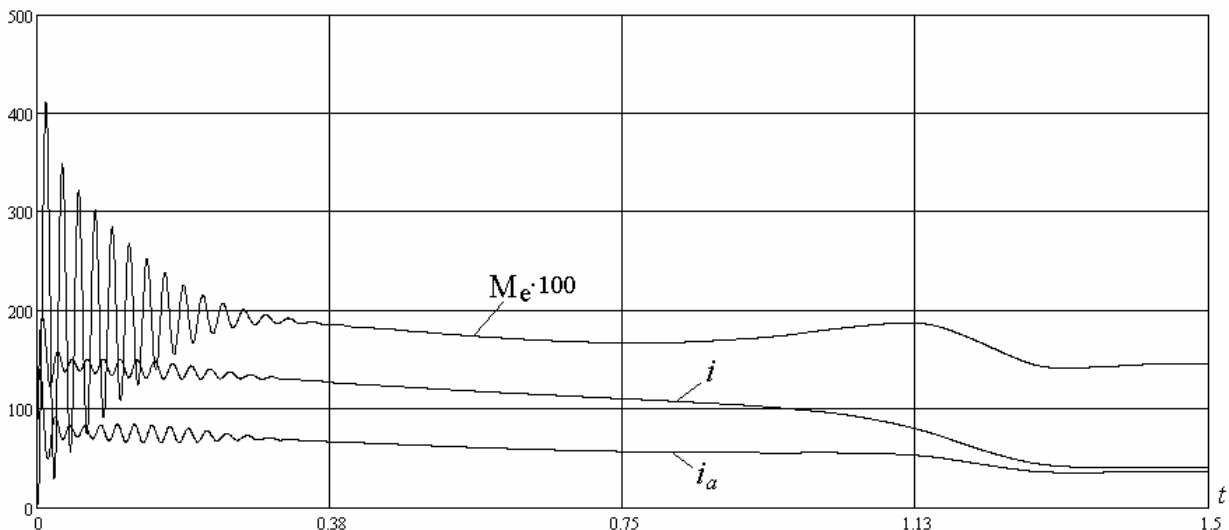
де k_i – передавальне число від вала двигуна до осі обертання кривошипа.

Остаточно рівняння (10) з урахуванням (11), (12) можна подати у вигляді

$$\frac{ds}{dt} = \frac{p}{J\omega_0} (M_e - M_e) + \frac{\omega_0(1-s)^2}{2Jpk_i} \frac{dJ}{d\alpha}. \quad (13)$$

Для розрахунку перехідного процесу необхідно проінтегрувати одним із числових методів систему рівнянь (9), (13), обчислюючи при цьому на кожному крокові (підкрокові) диференціальні параметри АД відповідно до [7]. Отримана вище функціональна залежність (8) дає змогу під час розрахунку перехідного процесу визначати необхідне значення ємності конденсаторів для компенсації реактивної складової струму в лінії пересилання.

Як приклад, на рисунку показані розрахункові криві зображуючого вектора струму статора i та електромагнітного моменту M_e (у відносних одиницях), а також струму в лінії i_a за умови його компенсації відповідно до викладеного вище під час пуску двигуна 4AP160S4Y3, який приводить в рух верстат-гойдалку 7СК8-3,5-4000.



Розрахункові криві

Висновки. У зв'язку з тим, що ШНВУ мають значну інерційність рухомих частин, пускові режими АД є тривалими. Оскільки аперіодичні складові струмів згасають за перші кілька періодів зміни

напруги живлення, решту частину пускового режиму можна вважати квазіперіодичною. На підставі розрахунку сукупності періодичних режимів можна визначити для кожного значення ковзання величину ємності конденсаторів, яка необхідна для компенсації реактивної потужності. Запропонований у статті метод розрахунку дає змогу визначати закон зміни ємності компенсуючих пристроїв, необхідних для зменшення струмів у мережі, яка живить ШНВУ, у пускових режимах, що істотно зменшує втрати електроенергії.

1. Бак С.И., Читыховян С.П. *Электрификация блочно-комплектных установок нефтяной промышленности*. – М.: Недра, 1989. – 183 с. 2. Блантер С.Г., Суд И.И. *Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности: Учебник*. – М.: Недра, 1980. – 478 с. 3. Бойко В.С. *Розробка та експлуатація нафтових родовищ*. – К.: Реал Прінт, 2004. – 695 с. 4. Железко Ю.С. *Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии*. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с. 5. Лысенко В.Д. *Разработка нефтяных месторождений. Теория и практика*. – М.: Недра, 1996. – 366 с. 6. *Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами* / Под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с. 7. Фильц Р.В. *Математические основы теории электромеханических преобразователей*. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с. 8. Фильц Р.В., Онышко Е.А., Плахтына Е.Г. *Алгоритм расчета переходных процессов в асинхронной машине с учетом насыщения и вытеснения тока // Преобразователи частоты для электропривода*. – Кишинев: Штиинца, 1979. – С. 11–22.

УДК 621.77

Т.Б. Нікітіна

Українська інженерно-педагогічна академія,
кафедра систем управління

ЦИФРОВЕ РОБАСТНЕ УПРАВЛІННЯ ДВОМАСОВОЮ ОБМОТУВАЛЬНОЮ МАШИНОЮ

© Нікітіна Т.Б., 2007

Розроблено метод цифрового робастного управління двоканальним електроприводом обмотувальної машини з урахуванням пружних елементів як двомасової системи для стабілізації динамічних характеристик системи управління обмотувальною машиною. Наведено приклад динамічних характеристик такої системи.

This article deals with the questions of dynamic characteristics stabilization for winding machine control system with the help of robust control for winding machine with elastic elements as three– masses system. The example of dynamic characteristics for such system is given.

Вступ. Якість процесу нанесення обмотувальних стрічок значною мірою залежить від точності підтримки технологічних параметрів на заданому рівні. Для підтримки швидкості обертання приводного механізму і натягу обмотувальної стрічки сучасні обмотувальні машини обладнують електромеханічними системами автоматичної підтримки цих технологічних параметрів на заданому рівні. Обмотувальна машина як об'єкт управління натягом обмотувальної стрічки і швидкістю обертання приводного механізму є нестационарним об'єктом, параметри якого змінюються в широких межах під час роботи. Найістотніша зміна параметрів обмотувальної машини відбувається в міру вироблення обмотувальної стрічки з кружка в процесі обмотки кабелів. При цьому змінюється момент інерції диска з обмотувальною стрічкою і радіус сходу обмотувальної стрічки з диска. У [1–3] виконаний синтез оптимальних регуляторів, спостерігачів і компенсаторів для трьох