

УДК 621.316.7

Гадай А. В., к.т.н.

Луцький національний технічний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВІДХИЛЕНЬ НАПРУГИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK

**Гадай А. В. Моделювання роботи синхронного двигуна для зменшення відхилень напруги в середовищі MATLAB/SIMULINK.** В статті розглядається робота синхронного двигуна в складі бурової установки, яка живиться від шин обмеженої потужності. Подано математичну модель двигуна та досліджений вплив регулювання збудження на роботу мережі. Показано, що форсування збудження синхронного двигуна дає можливість зменшити зниження напруги за рахунок динамічної компенсації реактивної потужності.

**Ключові слова:** напруга, синхронний двигун, автоматичне регулювання збудження, форсування збудження, динамічна компенсація реактивної потужності.

Форм. 3. Рис. 6. Літ. 7.

**Гадай А. В. Моделирование работы синхронного двигателя для уменьшения отклонений напряжения в среде MATLAB/SIMULINK.** В статье рассматривается работа синхронного двигателя в составе буровой установки, которая питается от шин ограниченной мощности. Подано математическую модель двигателя и исследовано влияние регулирования возбуждения на работу сети. Показано, что форсирование возбуждения синхронного двигателя позволяет уменьшить снижение напряжения за счет динамической компенсации реактивной мощности.

**Ключевые слова:** напряжение, синхронный двигатель, автоматическое регулирование возбуждения, форсировка возбуждения, динамическая компенсация реактивной мощности.

**Gadai A. Simulation of synchronous motor for reducing voltage deviations in MATLAB / SIMULINK.** The article reviews the work of synchronous motor as part of rig, which is powered by the bus limited power. Submitted a mathematical model motor and investigated the effect of excitation control on the network. Shown that forcing excitation synchronous motor can reduce the voltage drop through the dynamic reactive power compensation.

**Keywords:** voltage, synchronous motor, automatic regulation the excitation, forced excitation, dynamic reactive power compensation.

**Постановка проблеми.** У випадку відхилення рівня напруги від оптимальної величини сумарні втрати, які визначаються технологічними та електромагнітними збитками, збільшуються [1]. Технологічні збитки враховують збитки від порушення технологічного процесу, погіршення якості продукції, зменшення продуктивності праці, Електромагнітні збитки характеризуються збільшенням втрат електроенергії, виходом з ладу електротехнічного обладнання, порушенням роботи автоматики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вибір критерію оптимальності є важливою і складною задачею, а використання необґрунтованих критеріїв часто призводить до прийняття рішень, які не забезпечують бажаних техніко-економічних показників роботи електроприводів, включаючи і надійність. Необхідно відмітити, що загального, єдиного підходу до вибору критеріїв оптимізації показників якості електроенергії для крупних електроприводів, які працюють в електричних мережах обмеженої потужності немає. В роботах [2, 3] стверджується, що оптимальними критеріями регулювання струму збудження синхронних двигунів (СД) є економічність роботи самої машини і найкраще співвідношення її електромеханічних показників. Однак такий підхід є неповним. Система автоматичного регулювання збудження (АРЗ) СД повинна враховувати технологічні особливості режимів роботи СД і найповніше використання їх компенсувальної здатності, яка дозволяє суттєво поліпшити якість напруги живлення у вузлі електричної мережі. АРЗ СД повинен забезпечувати мінімум втрат електроенергії в електричній мережі.

**Невирішені частини проблеми.** Пристрої автоматичного регулювання збудження (АРЗ) синхронних двигунів (СД) виконуються так, щоб протягом кожного технологічного режиму напруга у вузлі навантаження підтримувалась оптимальною. Існуючі АРЗ не дозволяють прогнозувати або керувати з випередженням режимами напруги і показниками якості електроенергії. При зміні навантаження двигуна неможливо встановити оптимальний струм збудження. Його необхідно автоматично регулювати в залежності від конкретних умов, які характеризують електропостачальну систему і навантаження СД. Вибір закону АРЗ повинен виконуватись з врахуванням можливих змін рівня напруги.

**Метою дослідження** є визначення можливості використання СД для зменшення різких і глибоких знижень напруги за рахунок динамічної компенсації реактивної потужності.

**Основні результати дослідження.** Методи дослідження режимів роботи потужних синхронних електроприводів, які працюють в електричних мережах обмеженої потужності, базуються на використанні аналітичних залежностей і математичних моделей для ЕОМ. Загальноприйнятим при вирішенні таких задач є розділення дослідження на аналіз квазіусталених режимів, аналіз перехідних процесів при пуску двигунів та їх динамічної стійкості.

Системи рівнянь можуть бути подані в рухомих або нерухомих системах координат. Головна складність чисельного аналізу з використанням нерухомих системи координат при розрахунку перехідних процесів СД пов'язана з необхідністю обертання на кожному інтервалі матриці коефіцієнтів високого порядку, який визначається кількістю розрахункових контурів. При цьому вимагається великий обсяг обчислень і відповідний йому машинний час.

При вивченні квазіусталених режимів СД використовують рівняння Парка-Горєва в  $d, q$ -координатах, що записані через діючі значення величин [1]. Систему рівнянь, що характеризує електромагнітні перехідні процеси СД подамо у матричному вигляді

$$\begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{sf} & M_{sD} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & M_{sQ} \\ 1,5M_{sf} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ 1,5M_{sD} & 0 & M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 1,5M_{sQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \\ \frac{dI_f}{dt} \\ \frac{dI_D}{dt} \\ \frac{dI_Q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_d \\ -U_q \\ U_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & \omega L_q & 0 & 0 & \omega M_{sQ} \\ -\omega L_d & R_s & -\omega M_{sf} & -\omega M_{sD} & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $R_s, R_f, R_D, R_Q$  – активні опори відповідно обмотки статора, обмотки збудження та демпферних обмоток по осях  $D, Q$ ;

$L_d, L_q$  – індуктивності статорної обмотки відповідно по повздовжній і поперечній осях;

$M_{sf}, M_{sD}, M_{sQ}, M_{fD}$  – взаємні індуктивності між відповідними обмотками СД;

$U_d, U_q, U_f$  – напруги відповідно обмотки статора по осях  $d, q$  та обмотки збудження.

Систему рівнянь (1) можна записати:

$$\begin{aligned} \frac{dI_d}{dt} &= \alpha_{11}(-U \sin \theta + p\omega_r L_q I_q - R_s I_d) + \alpha_{12}(U_f - R_f I_f); \\ \frac{dI_q}{dt} &= \alpha_q(E - U \cos \theta - p\omega_r L_d I_d - R_s I_q); \\ \frac{dI_f}{dt} &= \alpha_{12}(-U \sin \theta + p\omega_r L_q I_q - R_s I_d) + \alpha_{22}(U_f - R_f I_f), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\alpha_{11} = L_f / (L_f L_d - M_{sf}^2)$ ;  $\alpha_{12} = M_{sf} / (L_f L_d - M_{sf}^2)$ ;

$\alpha_{22} = L_d / (L_f L_d - M_{sf}^2)$  – обернені індуктивності, що характеризують зв'язок між струмами та ЕРС обмотки збудження та обмотки якоря по повздовжній осі;

$\alpha_q = 1 / L_q$  – обернена індуктивність статора по поперечній осі.

Рівняння (1) або (2) доповнюються рівняннями, що характеризують електромеханічні процеси

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{-\frac{P(t)}{\omega_r} - M_n(t)}{J}; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_r - \frac{\omega}{p_0}. \quad (3)$$

Живлення бурильної установки здійснюється за схемою, наведеною на рис.1,а. Схема досліджуваної мережі складається з джерела живлення, лінії та вузла навантаження, до складу якого входить синхронний двигун приводу лебідки. На рис.1,б наведена заступна схема мережі, на основі якої складена схема для моделювання рис.2.

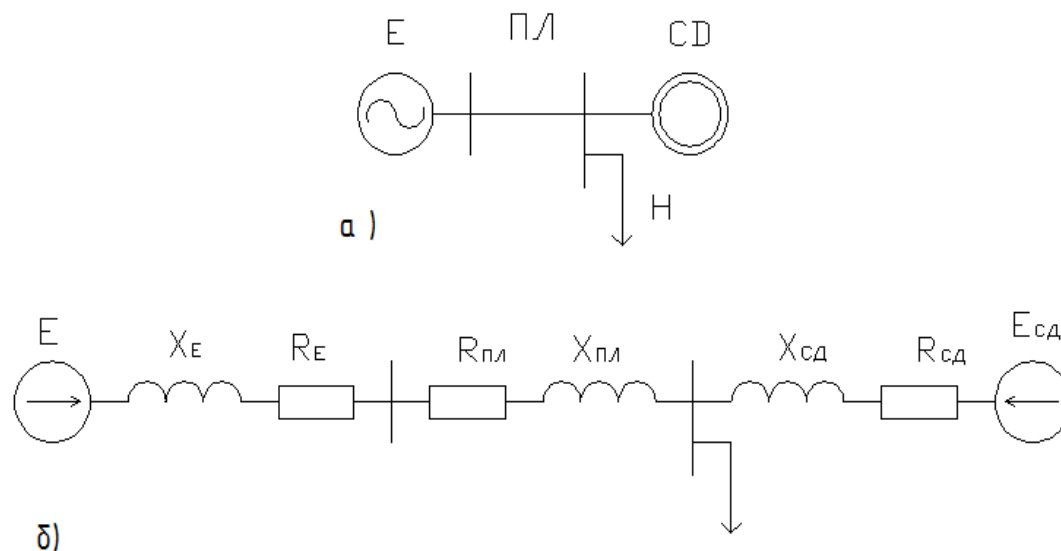


Рис. 1. Схема живлення бурової установки з СД

Електропривод лебідки повинен піднімати і опускати бурильну колону із заданою швидкістю при змінній масі колони. Для оптимального використання електроприводу [5] необхідно підтримувати постійну потужність в усьому діапазоні зміни маси бурильної колони під час піднімання і опускання. У випадку живлення бурової установки від системи електропостачання обмеженої потужності, активна та реактивна потужності СД сильно змінюються [6] і навантаження СД лебідки має ударний характер. Це призводить до відхилення і коливання напруги на вводі бурової установки і коливання СД. В наслідок цього виникають аварії і передчасний вихід з ладу двигуна [7].

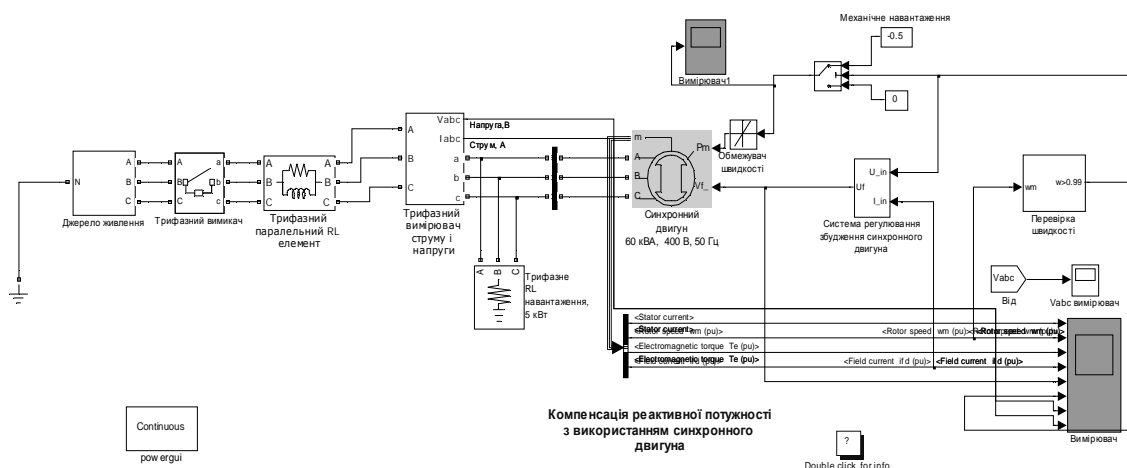


Рис. 2. Модель системи живлення бурової установки з СД

На бурових установках для приводу лебідки використовуються СД типу СДЗБ-13 потужністю 450–630 кВт. Система збудження таких двигунів забезпечує форсування збудження, при цьому напруга й струм збудження будуть максимальними, а час досягнення максимального струму збудження – мінімальним.

У разі форсування струму збудження (рис. 3) СД мають здатність різкої зміни реактивної потужності (рис. 4). У даному випадку струм збудження форсується з 267 А до 330 А. При цьому реактивна потужність номінально завантаженого СД зменшується з 260 квар до 15 квар.

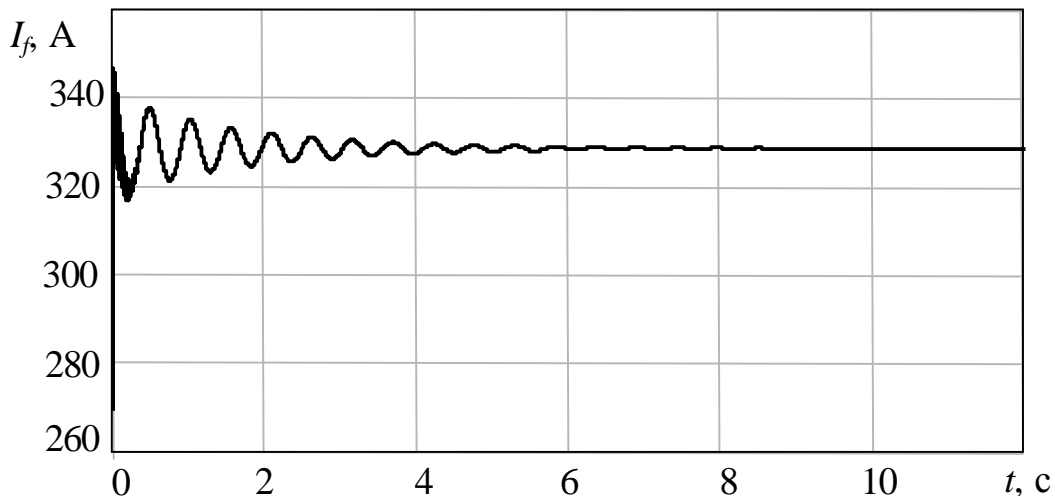


Рис. 3. Форсування струму збудження СД

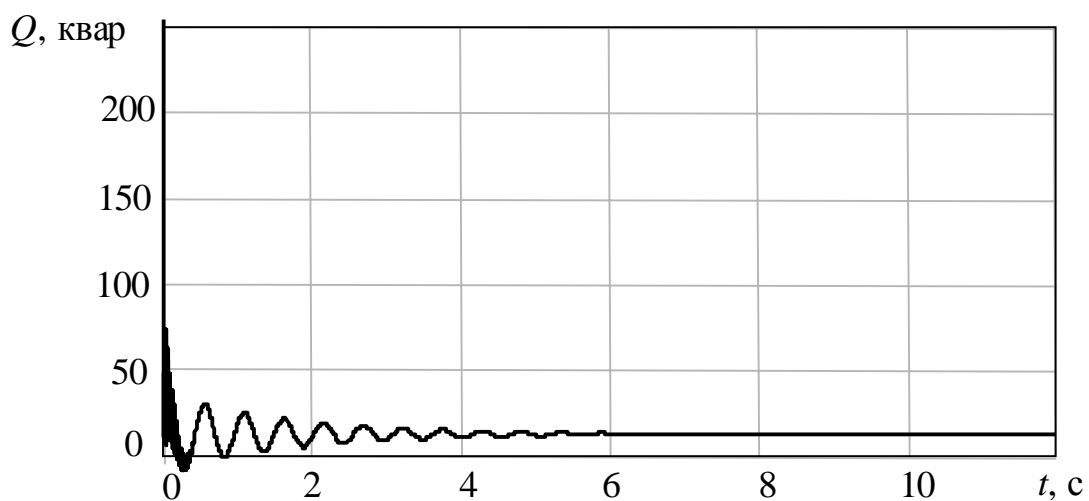


Рис. 4. Зменшення споживання реактивної потужності СД у разі форсування збудження

Під час форсування струму збудження різко змінюється активна потужність (рис. 5), проте зниження напруг зменшується (рис. 6). залежності амплітуди фазної напруги побудовані якщо активний та реактивний опори лінії живлення становлять відповідно 2 Ом і 8 Ом.

**Висновки.** Аналізуючи вище викладене, можна констатувати, що форсування збудження СД забезпечує можливість зменшити зниження напруги за рахунок динамічної компенсації реактивної потужності. Однак при цьому виникають коливання активної потужності, що вимагає їх демпфірування.

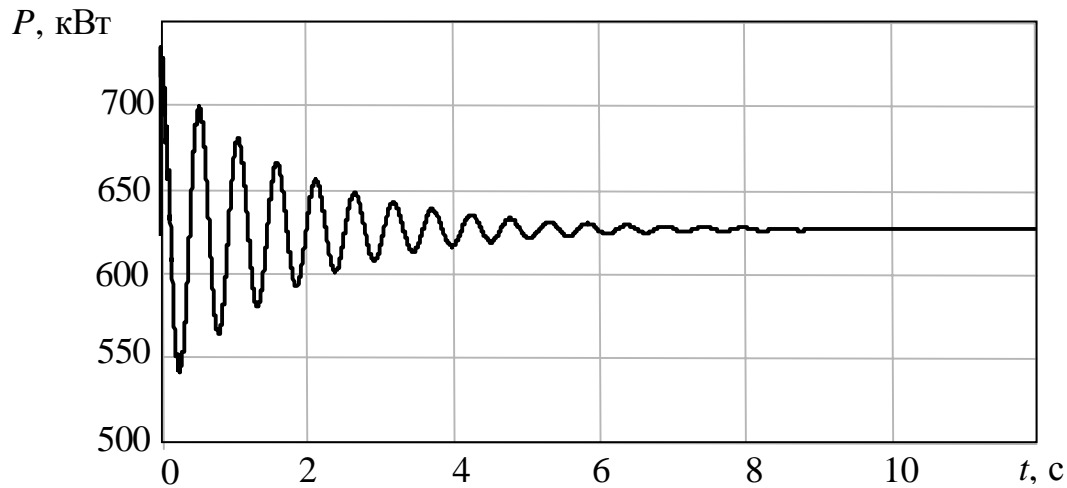


Рис. 5. Залежність активної потужності СД у разі форсування збудження

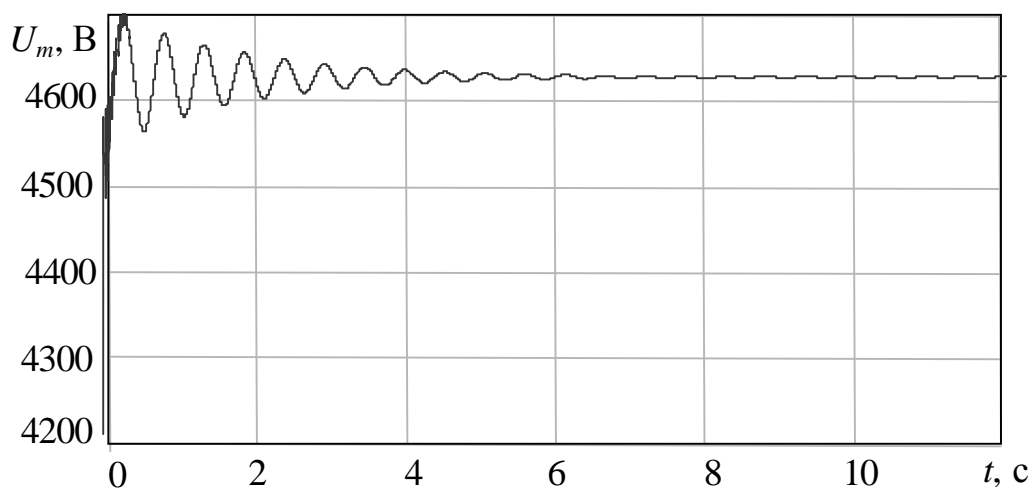


Рис. 6. Залежність амплітуди фазної напруги у разі форсування збудження СД

1. Суднова В.В. Качество электрической энергии / В.В. Суднова. – М.: ЗАО Энергосервис, 2000. – 80 с.
2. Красник В. В. Автоматические устройства по компенсации реактивных нагрузок в электрических сетях предприятий / В. В. Красник. – М.: Энергия, 1975. – 113 с.
3. Айрапетян Г. А. Расчет на ЭЦВМ режима работы синхронного двигателя при изменении различных параметров режима / Г. А. Айрапетян, Г. А. Налчаджян. – В кн.: Научн. тр. – Ереван.политехн.ин-т, 1972. – №28. – С.152–159.
4. Костюк О. М. Колебания и устойчивость синхронных машин / О. М. Костюк, М. И. Соломаха. – К.: Наукова думка, 1991. – 200 с.
5. Моцохейн Б.И., Парфенов Б.М. Электропривод буровых лебедок. / Б.И. Моцохейн, Б.М. Парфенов. – М.: Недра, 1978. – 304 с.
6. Исследование автоматического регулятора возбуждения приводного синхронного двигателя буровой лебедки. Машины и нефтяное оборудование. / И.И.Саяк, Р.А.Селепина, Г.С.Корниевич, В.Н.Холин. – М.: ВНИИОЭНГ, 1975, № 8, с.30-35.
7. Абрамович Б.Н., Купцов А.Б., Лозовой И.Ф. Бесщеточныя синхронные двигатели с повышенными эксплуатационными характеристиками для главных приводов буровых установок. Машины и нефтяное оборудование. / Б.Н. Абрамович, А.Б. Купцов, И.Ф. Лозовой – М.: ЕНИИОЭНГ, 1982, № I, с.26-28.