

УДК 004.942:62-83

В.С. КОСТИШИН (д-р техн. наук, проф.), **П.О. КУРЛЯК** (канд. техн. наук),
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
pkurlyak@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПЛАВНОГО ПУСКУ

Проведено аналіз енергоспоживання під час пуску магістрального насосного агрегату з використанням софтстартера із різними законами регулювання напруги в порівнянні з прямим пуском. Моделювання режимів роботи виконано на основі комплексної Bond Graph моделі електроприводного відцентрового насосного агрегату із підмоделлю регулятора напруги.

Ключові слова: Bond Graph модель, пристрій плавного пуску, асинхронний двигун, електроприводний відцентровий насосний агрегат, магістральні нафтопроводи, динамічні режими роботи.

Постановка проблеми. Переважна більшість магістральних насосних агрегатів (МНА) в даний час оснащена нерегульованими електроприводами з асинхронними і синхронними двигунами. Незважаючи на цілком очевидні переваги регульованих електроприводів, підтвержені досвідом роботи в інших галузях промисловості, їх застосування на магістральних нафтопроводах є досить обмеженим. В першу чергу це пояснюється відсутністю до недавнього часу надійних регуляторів напруги великої одиночної потужності, придатних для МНА у важких умовах експлуатації. Стримуючим фактором також була відсутність взаємопов'язаних моделей насосних агрегатів, які б наглядно демонстрували переваги та недоліки використання регульованого електроприводу саме для магістральних нафтопроводів.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Питанням дослідження режимів роботи електроприводів із застосуванням пристроїв плавного пуску (софтстартерів) присвячено велику кількість робіт. Так в роботі [1], розглянуто застосування пристроїв плавного пуску в електроприводах кранових механізмів, як альтернативи перетворювачам частоти. В роботах [2–3] досліджено ефективність застосування різних законів впливу зміни величини першої гармоніки напруги живлення стосовно електромеханічних процесів під час пуску асинхронних двигунів. У роботі [4] наведені позитивні фактори від впровадження софтстартерів на магістральних нафтопроводах та критерії їх вибору для насосних агрегатів. Однак, задача дослідження енергоспоживання в перехідних режимах роботи регульованих електроприводів у порівнянні з прямим пуском залишилася поза увагою.

Задачі досліджень. Дослідження впливу законів регулювання напруги автоматизованої системи плавного пуску на величину втрат енергії в перехідних режимах роботи електроприводних магістральних насосних агрегатів.

Виклад основного матеріалу. Прямі пуски двигунів великої потужності МНА викликають ударні навантаження в передавальних механізмах, неприпустимі посадки напруги в системах електропостачання. Як наслідок, виникає зношення та пробій ізоляції обмоток, підгорання контактів, значно скорочується термін служби підшипників та технологічних механізмів. Поява повністю керованих силових напівпровідникових приладів (*IGBT*, *IGCT*, *GTO*) привела до радикальних змін в схемотехніці пристроїв силової електроніки, що дозволило створити регульовані електроприводи великої (десятки МВт) потужності. Застосування пристроїв плавного пуску в системах електроприводу МНА безумовно призведе до зменшення кратності пускових струмів та електромеханічних зусиль в обмотках електродвигуна, зниження ризику механічного руйнування валів приводу, зведення до мінімуму гідроудару в системі. Крім того пуск насоса на відкриту засувку практично не відрізнятиметься від пуску на закрити засувку. Однак, одночасно із зазначеними позитивними факторами застосування софтстартерів, необхідно враховувати зростання втрат енергії в двигуні насосного агрегату в порівнянні з прямим пуском.

Основною задачею дослідження було порівняння різних законів регулювання напруги при різному часі розгону софтстартера та аналіз спожитої енергії за час пуску в порівнянні з прямим пуском МНА. Задачу дослідження реалізовано за допомогою комплексної Bond Graph моделі електроприводного відцентрового насосного агрегату (ЕВНА) [5], яку доповнено підмоделлю регулятора напруги *TRU* (рис. 1). В підмоделі софтстартера *TRU* закладено лінійний (1) та експоненційний (2) закони зміни напруги

$$U_{TRU\ line} = U_0 \cdot \frac{t}{t_u}, \quad (1)$$

$$U_{TRU\ exp} = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{exp}}} \right), \quad (2)$$

де U_0 початкова напруга; t_u – час зміни значення напруги під час пуску (час розгону софтстартера); t – час імітаційного моделювання; T_e – постійна часу експоненційного закону зміни напруги.

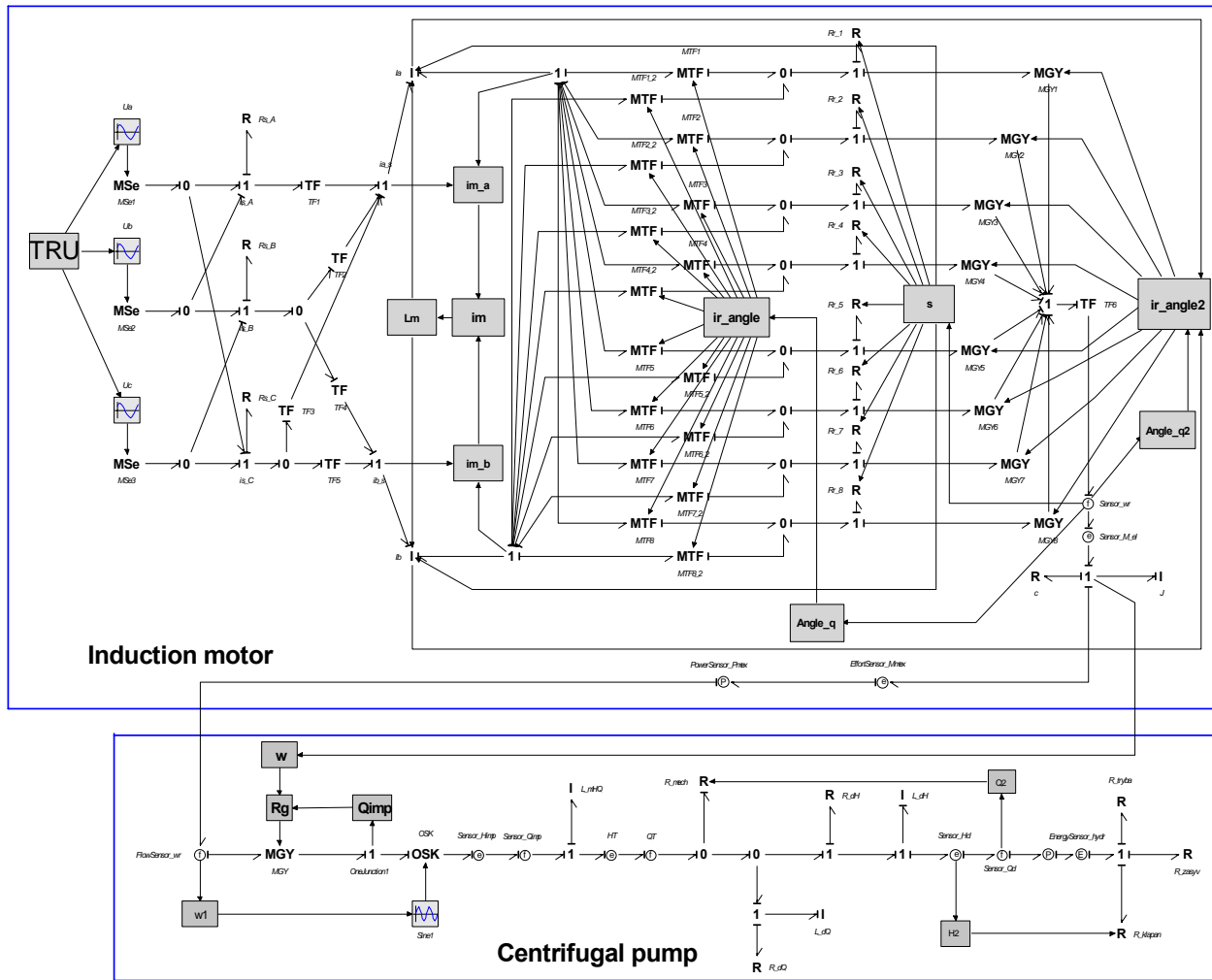


Рисунок 1 – Комплексна Bond Graph модель ЕВНА із підмоделлю регулятора напруги

На основі комплексної Bond Graph моделі ЕВНА програма імітаційного моделювання 20-sim автоматично генерує та розв'язує диференційні рівняння, які описують динамічну поведінку МНА, а саме: систему рівнянь рівноваги напруг в обмотках двигуна (3), стану насоса (5) та запірної арматури (6), рівняння електромагнітного моменту (4) та зв'язку між підмоделями двигуна і насоса на основі балансу потужностей і рівняння руху електропривода (7), [5]

$$\begin{cases} u_{\alpha}^s = R_{\alpha}^s i_{\alpha}^s + L_{\alpha}^s (i_m) \frac{di_{\alpha}^s}{dt} + L_m (i_m) \frac{di_{\alpha}^r}{dt}, \\ u_{\beta}^s = R_{\beta}^s i_{\beta}^s + L_{\beta}^s (i_m) \frac{di_{\beta}^s}{dt} + L_m (i_m) \frac{di_{\beta}^r}{dt}, \\ 0 = R_{\alpha}^r (s) i_{\alpha}^r + L_{\alpha}^r (i_m) \frac{di_{\alpha}^r}{dt} + L_m (i_m) \frac{di_{\alpha}^s}{dt} + \\ \quad + \omega^r (L_{\beta}^r (i_m) i_{\beta}^r + L_m (i_m) i_{\beta}^s), \\ 0 = R_{\beta}^r (s) i_{\beta}^r + L_{\beta}^r (i_m) \frac{di_{\beta}^r}{dt} + L_m (i_m) \frac{di_{\beta}^s}{dt} - \\ \quad - \omega^r (L_{\alpha}^r (i_m) i_{\alpha}^r + L_m (i_m) i_{\alpha}^s); \end{cases} \quad (3)$$

$$T_e = \frac{p}{2} [i_{\alpha}^r (M i_{\beta}^s + L^r i_{\beta}^r) - i_{\beta}^r (M i_{\alpha}^s + L^r i_{\alpha}^r)]; \quad (4)$$

$$\begin{cases} p g H_E = L_{mHQ} \frac{dQ_T}{dt} + L_{dQ} \frac{dQ_{vol}}{dt} + Q_{vol} R_{dQ} + \\ \quad + Q_{mech} R_{mech}, \\ p g H_E = L_{mHQ} \frac{dQ_T}{dt} + L_{dH} \frac{dQ_{hydr}}{dt} + Q_{hydr} R_{dH} + \\ \quad + Q_{hydr} (R_Z + R_{KL} + R_{TR}), \\ Q_T - Q_{mech} - Q_{vol} - Q_{hydr} = 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} R_{KL} = R_0 e^{-\left(\frac{t-t_1}{T_a}\right)}, \\ R_Z = 0, \quad R_{TR} = 1. \end{cases} \quad (6)$$

$$p g H_{\infty} Q_{\infty} = T_L \omega_m; \quad T_e = J \frac{d\omega^r}{dt} + c \omega^r + T_L. \quad (7)$$

Проведено дослідження пускових режимів роботи при прямому та плавному пуску на відкриту засувку електроприводного відцентрового насосного агрегату NGK-500/450/100 із приводом АД 4АЗМВ-2500/6000-У2 нафтоперекачувальної станції «Плещівка» філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба». Для цього ж агрегату були отримані експериментальні залежності при прямому пуску, за допомогою яких підтверджена адекватність комплексної *Bond Graph* моделі ЕВНА.

Результати моделювання зображені у вигляді значень споживаної енергії (табл.1), обвідних кривих споживаного струму (рис. 2, 4) та електродинамічного моменту (рис. 3, 5) під час прямого та плавного пуску при лінійному та експоненційному законі зміни напруги за різного часу розгону софтстартера. Для аналізу спожитої енергії за час пуску МНА в *Bond Graph* модель встановлено давачі енергії в фазі статора двигуна.

Таблиця 1 – Значення спожитої за час пуску енергії (кВт·год) в залежності від різного часу розгону софтстартера

Спосіб пуску ЕВНА	Час розгону софтстартера t_u , с						
	$t_{u0}=0$	$t_{u1}=3$	$t_{u2}=6$	$t_{u3}=9$	$t_{u4}=12$	$t_{u5}=15$	$t_{u6}=18$
Прямий пуск	6,749	–	–	–	–	–	–
Софтстартер з лінійним законом зміни напруги	–	6,585	6,271	6,662	6,745	7,315	7,741
Софтстартер з експоненційним законом зміни напруги	–	6,581	6,609	6,320	6,091	6,423	6,365

У результаті аналізу пускових режимів роботи МНА із застосуванням софтстартера з лінійним та експоненційним законом регулювання напруги встановлено, що за однакового часу t_u зміни величини напруги для експоненційного закону характерний швидший розгін двигуна МНА. Крім того, за однакового часу розгону двигуна кратності пускового струму та електродинамічного моменту для експоненційного закону менші в порівнянні з лінійним. Також встановлено, що із збільшенням часу розгону двигуна збільшується споживана енергія за час пуску МНА. Так для лінійного закону регулювання напруги починаючи з часу розгону софтстартера понад $t_u = 12$ с. споживана енергія стає більшою в порівнянні з прямим пуском двигуна. Таким чином зменшення кратностей пускових струмів та електродинамічних моментів за допомогою софтстартера може призвести до збільшення споживання енергії регульованим електроприводом. Отже, в кожному конкретному випадку пуску МНА необхідно проводити аналіз доцільності застосування того чи іншого закону регулювання напруги з точки зору підвищення рівня ефективності функціонування.

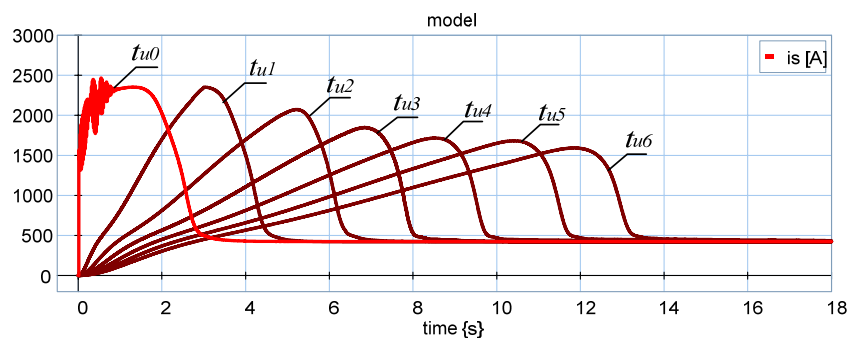


Рисунок 2 – Обвідні криві струмів статора двигуна МНА при прямому (t_{u0}) та плавному ($t_{u1} - t_{u6}$) пуску за лінійним законом зміни напруги.

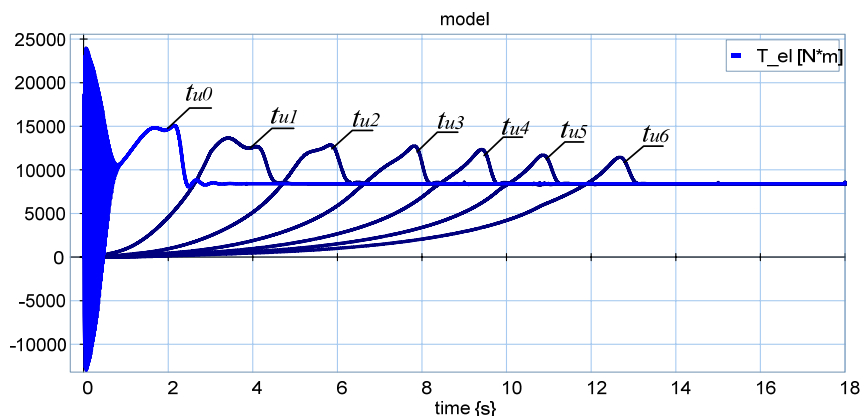


Рисунок 3 – Зміна електродинамічного моменту двигуна МНА при прямому (t_{u0}) та плавному ($t_{u1} - t_{u6}$) пуску за лінійним законом зміни напруги.

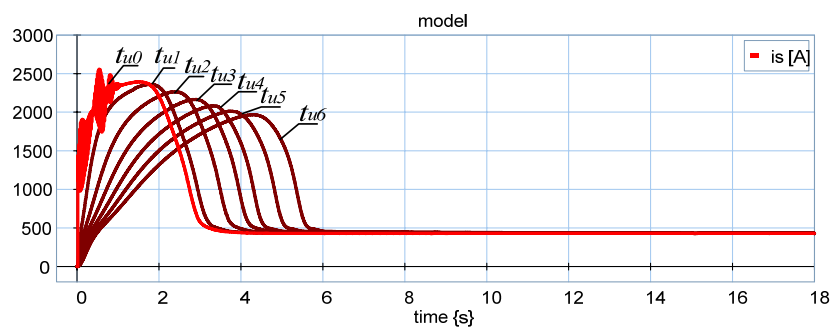


Рисунок 4 – Обвідні криві струмів статора двигуна МНА при прямому (t_{u0}) та плавному ($t_{u1} - t_{u6}$) пуску за експоненційним законом зміни напруги.

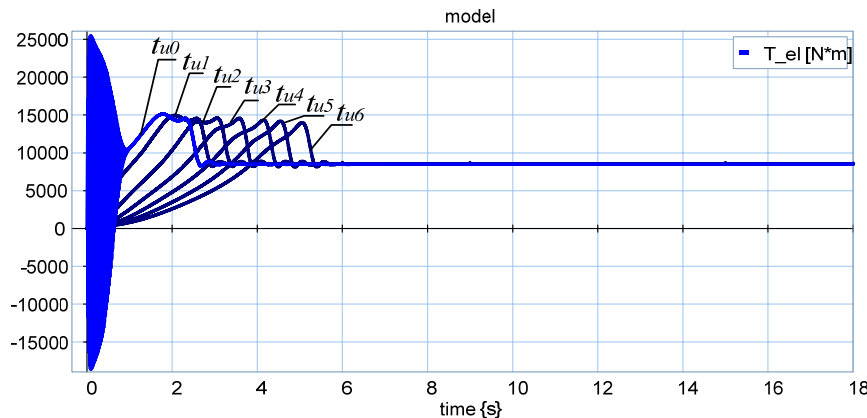


Рисунок 5 – Зміна електродинамічного моменту двигуна МНА при прямому (t_{u0}) та плавному ($t_{u1} - t_{u6}$) пуску за експоненційним законом зміни напруги.

Висновки. Проведено аналіз енергоспоживання під час пуску магістрального насосного агрегату з використанням софтстартера із різними законами регулювання напруги в порівнянні з прямим пуском. Встановлено, що експоненційний закон значно пришвидшує розгін двигуна, зменшує кратність пускових струмів та електромеханічних зусиль в залежності від часу розгону пристрою. Однак, із збільшенням часу розгону двигуна збільшується споживана енергія. Таким чином зменшення кратності пускових струмів та електродинамічних моментів за допомогою софтстартера може призвести до збільшення споживання енергії за час пуску регульованим електроприводом у порівнянні з прямим пуском.

Використання комплексної Bond Graph моделі ЕВНА для моделювання режимів роботи в системах пристроїв плавного пуску дає можливість одночасно із електричними характеристиками двигуна враховувати характеристики насоса, робочої рідини та запірної арматури. Крім того, це дозволяє реалізувати більш раціональні алгоритми керування, які забезпечать вирішення питання підвищення рівня енергоефективності та ресурсозбереження обладнання магістральних нафтопроводів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фираго Б.И. Применение устройств плавного пуска и торможения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в электроприводах крановых механизмов передвижения / Б.И. Фираго, Д.С. Васильев // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – №4(80). – С. 30–38.
2. Васильев Д.С. Исследование электромеханических процессов при прямом пуске и торможении асинхронных двигателей с учетом переменных параметров и сравнение их с плавным пуском и торможением / Д.С. Васильев // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – №4(60), Ч.1. – С. 43–49.
3. Калинов А.П. Исследование эффективности формирования пусковых режимов асинхронного двигателя / А.П. Калинов, М.Ю. Юхименко, С.В. Исаев // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2007. – №2(2). – С. 15–20.
4. Автоматизированная система плавного пуска высоковольтных двигателей магистральных насосов нефтепровода «Дружба» ОАО Транснефть [Электронный ресурс] / [Д.А. Поздеев, А.Н. Ерезеев, О.Г. Яковлев, О.В. Котельников] // Сайт компанії АБВ. – Режим доступу: <http://www.abb.ru>.
5. Костишин В.С. Дослідження динамічних режимів роботи електроприводних відцентрових насосних агрегатів за допомогою їх комп'ютерно-орієнтованих Bond Graph моделей / Володимир Костишин, Петро Курляк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №2. – С. 148–153.

REFERENCES

1. Firago B. I., Vasilyev D. S. Application of squirrel-cage induction motor soft starting and braking in the electric drives of crane travel mechanisms // *Electrotechnic and computer systems*. 2011; №4(80): 30–38.
2. Vasilyev D. S. Analysis of electromechanical transients for squirrel-cage induction motor direct starting and braking with allowance for variable parameters and transients comparison with soft starting and braking ones // *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2010; №4(60) P.1: 43–49.
3. Kalinov A. P., Yukhimenko M. Y., Isaev S. V. Investigation of the efficiency formation of the induction motor starting modes // *Electromechanical and energy systems*. 2007; №2(2): 15–20.
4. Pozdeev D. A., Erezeev A. N., Yakovlev O. G., Kotelnikov O. V. Automated system for high-voltage soft starter motors main pumps "Druzhba" pipeline Transneft JSC // Website of ABB: <http://www.abb.ru>.
5. Kostyshyn V. S., Kurlyak P. O. The investigation of the electric drive centrifugal pump units dynamic modes by their computer-oriented Bond Graph models // *Journal of Vinnytsia Polytechnical Institute*. 2012; №2: 148–153.

Надійшла до редакції 21.02.2013

Рецензент: В.Ф. Сивокобиленко

В.С.КОСТЫШИН, П.Е. КУРЛЯК

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Моделирование режимов работы электроприводных магистральных насосных агрегатов с использованием автоматизированной системы плавного пуска. Проведены исследования энергопотребления при пуске магистрального насосного агрегата с использованием софтстартера с различными законами регулирования напряжения по сравнению с прямым пуском. Моделирование режимов работы выполнено на основе комплексной Bond Graph модели электроприводного центробежного насосного агрегата с подмоделью регулятора напряжения.

Ключевые слова: Bond Graph модель, устройство плавного пуска, асинхронный двигатель, электроприводной центробежный насосный агрегат, магистральные нефтепроводы, динамические режимы работы.

V. KOSTYSHYN, P. KURLYAK

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Modeling of Modes of Motor-Driven Mainline Pump Units Using Automated System with Soft Starter. In spite of obvious advantages of regulated electric drives, that have been confirmed by experience in other industries, their application to main oil pipelines is limited. The main research task was to compare different laws of the soft starters regulating voltage and to analyse the consumed energy during the start-up of the motor-driven centrifugal main pump unit compared with direct starting. Research tasks are implemented using the complex Bond Graph model of the motor-driven centrifugal pump unit which was added with submodels of voltage regulator. Linear and exponential laws the variation of voltage have been incorporated into submodels of soft starter TRU. Adjustable parameters of these laws are initial voltage U_0 and the voltage change time t_U during start the motor pump unit. Research starting modes have been performed with the direct start and soft start on the opened valve of the motor-driven centrifugal main pump unit NGK-500/450/100 with a drive induction motor 4A3MB-2500/6000-Y2 of Ukrtransnafta branch "Trunk oil pipelines "Druzhba" pumping station "Pleschivka". It was found that the exponential law more accelerates acceleration of the engine and reduces the multiplicity of starting currents and the electromechanical efforts depending on time acceleration. However, with increasing of time of engine's acceleration the energy consumption during start-up of motor-driven centrifugal pump unit is increased too. In this manner the inrush currents and electromagnetic moments multiplicities reduced with help of soft starter allows us to increase energy consumption during start time by adjustable electric drive compared with direct starting. Using the complex Bond Graph model of motor-driven centrifugal pump unit for modeling modes in soft starter's systems helps us to realize more rational controls algorithms which allow resolving the issue of increasing the energy efficiency level and energy saving equipment of main oil pipelines.

Key words: Bond Graph model, soft starter, induction motor, motor-driven centrifugal pump unit, main oil pipelines, dynamic modes.