

УДК 62-83

Н. С. Никорюк*, канд. техн. наук,
В. О. Есауленко*, канд. техн. наук,
В. М. Карпенко**, канд. техн. наук

*Донецький національний технічний університет, м. Донецьк,

**ДП „Науканафтогаз” НАК „Нафтогаз України”, м. Вишневе

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ФОРМУВАННЯ КЕРУЮЧОГО ВПЛИВУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА БУРОВОЇ ЛЕБІДКИ ЛБ 650 Е

У роботі розглянута система автоматичного керування напруги живлення на затискачах двигунів постійного струму з незалежним збудженням у перехідних режимах пуску. Розроблений алгоритм формування напруги дозволяє отримати бажаний закон зміни першої похідної моменту двигуна $dM / dt = Jd^2\omega / dt^2$, що обмежує динамічні навантаження в елементах кінематичних ланок.

Ключові слова: бурова установка, система підйимального агрегату, електропривод, система Г-Д, двигун, пуск, напруга на затискачах двигуна, керування зміною напруги.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Проблемами математичного моделювання і оптимізації за допомогою засобів обчислювальної техніки дизель-генераторних електроприводів у всьому світі займаються вже майже півстоліття. Але далеко не всі задачі, що сформульовані десятиліттями до цього, вдалося вирішити з необхідною точністю навіть для тягових приводів постійного струму [1].

Особливості роботи підйимальних агрегатів стаціонарних бурових установок накладають на систему управління двигунами наступні вимоги — мінімізувати під час пуску-зупинки перенавантаження: механічні в редукторах і талевій системі, гідродинамічні у свердловині, електродинамічні в якірному ланцюгу.

В електроприводі одночасно відбуваються два перехідні процеси: електромагнітний та механічний. Пуск електропривода відбуваються в три етапи [2]. На першому етапі домінуючим є електромагнітний, на другому — механічний перехідні процеси, на третьому етапі вагомими є обидва процеси. Для формування перехідних процесів в електроприводі використовують належні блоки задатчиків інтенсивності, що забезпечують темп зростання відповідного сигналу в перехідному режимі [3, с. 510—514]. Звичайно, ці блоки формують перехідний процес за рахунок зміни керуючого впливу за лінійним законом. Це дозволяє належним чином формувати механічний перехідний процес з обмеженнями на рів-

ні максимальних значень керованих змінних. Формування електромагнітного перехідного процесу не здійснюється. Тому актуальною є проблема розробки та дослідження алгоритмів формування перехідних процесів пуску дизель-генераторного електропривода підйимального агрегату стаціонарної бурової установки з урахуванням електромагнітного перехідного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування перехідного процесу в системах високої керованості, заснованих на регулюванні напруги в колі якоря двигуна постійного струму, дозволяє формувати оптимальні перехідні процеси [1; 2; 3, с. 507—509]. В [2] запропонований наступний алгоритм формування керуючого впливу — зміни напруги на затискачах двигуна. Зміна напруги на затискачах двигуна відбувається у відповідності до процесів, що протікають в електроприводі. На першому етапі формується такий закон зміни напруги живлення, що забезпечує досягнення максимально допустимих значень струму, потоку, моменту за мінімальний час із найменшим перерегулюванням; на другому – зміна напруги живлення забезпечує рух привода зі сталим прискоренням, струм, потік, момент є незмінними; на третьому етапі відбувається рух при незмінній напрузі на затискачах двигуна. Запропонований алгоритм формування керуючого впливу, визначений на першому етапі чисельними методами, дозволяє лише обмежити максимальні струм, момент, потік двигуна, але не дозволяє належним чином формувати його на цьому етапі. Формування перехідного процесу, запропоноване в [3], дозволяє формувати його лише на другому етапі — тобто в цьому разі виконується вплив на механічний перехідний процес пуску двигуна.

Постановка завдання. В роботі поставлені наступні задачі.

1. Розробити принцип формування керуючого впливу — зміни напруги задатчика інтенсивності системи автоматичного керування напруги живлення на затискачах двигунів постійного струму з незалежним збудженням силового привода бурової лебідки ЛБ 650 Е, що мінімізує під час пуску перенавантаження: механічні в редукторах і талевій системі, електродинамічні в якірному ланцюгу;
2. Розробити MATLAB — модель дослідження перехідних процесів пуску двигунів постійного струму з незалежним збудженням;
3. Провести дослідження перехідних процесів пуску двигунів бурової лебідки ЛБ 650 Е і визначити максимальні навантаження елементів силового електроприводу.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 1 приведені оптимальні залежності кутової швидкості $\omega = f(t)$, струму $i_a = f_1(t)$ двигуна, що забезпечують мінімальні динамічні навантаження меха-

нічної частини електропривода. На цьому рисунку T_1 — час зростання струму якоря двигуна за лінійним законом від нуля до максимального значення $I_{\text{макс}}$.

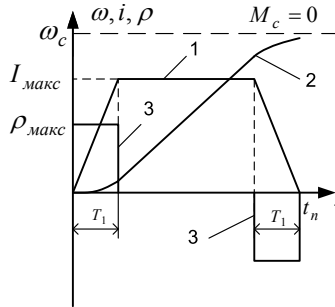


Рис. 1. Оптимальні залежності кутової швидкості $\omega = f(t)$, струму $i_{\text{я}} = f_1(t)$ двигуна постійного струму, що забезпечують мінімальні динамічні навантаження механічної частини електропривода 1 — залежність струму якоря двигуна $i_{\text{я}}(t)$ від часу, 2 — залежність кутової швидкості двигуна $\omega(t)$ від часу, 3 — залежність другої похідної кутової

$$\text{швидкості } \rho = \frac{d^2\omega}{dt^2} \text{ від часу}$$

Умовно можливо рахувати, що на першому етапі перехідного процесу пуску двигуна ($0 \leq t \leq T_1$) домінуючим є електромагнітний процес (зміна струму і моменту двигуна, кутова швидкість змінюється в стислих межах), на другому етапі ($T_1 \leq t \leq t_n - T_1$) домінуючим є механічний процес (зміна швидкості, струм, момент і двигуна обмежені), на третьому етапі ($t_n - T_1 \leq t \leq t_n$) вагомими є обидва процеси.

Добре відомо, що формування на першому етапі пуску двигунів ($0 \leq t \leq T_1$) залежності струму $i_{\text{я}}(t)$ та моменту $M(t)$ двигуна постійного струму за лінійним законом забезпечує плавне навантаження механічної частини електропривода (обмеження першої похідної струму та моменту двигуна) і є одним з найбільш простих шляхів рішення завдання обмеження навантаження елементів силового електропривода [3, с. 499—503]. Додаткове підвищення плавності навантаження механічної частини системи може бути досягнуто при обмеженні другої похідної моменту двигуна d^2M/dt^2 . Головним фактором є обмеження першої похідної моменту двигуна. Обмеження другої похідної моменту забезпечує той же самий ефект, що і обмеження тільки першої похідної моменту.

Нехтуючи робочими зазорами механічну частину електропривода бурової лебідки можливо представити двомасовою розрахунковою схемою (рис. 2).

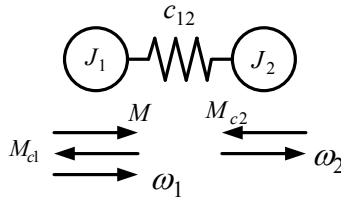


Рис. 2. Розрахункова двомасова схема механічної частини електропривода бурової лебідки ЛБ 650 Е, M — момент двигуна, M_{c1} — сумарний момент трат на валу двигуна, M_{c2} — сумарний момент опору руху вантажу, ω_1 , ω_2 — кутові швидкості першої та другої мас, сумарні, приведені до швидкості двигуна, моменти інерції усіх елементів: J_1 — жорстко зв'язаний з якорем двигуна, J_2 — жорстко зв'язаний з механізмом, c_{12} — приведена еквівалентна жорсткість зв'язку двох мас.

Момент пружної взаємодії між масами J_1 і J_2 , частота та період вільних коливань двомасової пружної механічної системи

$$M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$$\Omega_{12} = \sqrt{c_{12}(J_1 + J_2) / J_1 \cdot J_2}, \quad (1)$$

$$T_{12} = 2\pi / \Omega_{12}, \quad (2)$$

де φ_1 , φ_2 кутові шляхи першої та другої мас.

Таким чином, частота вільних коливань механічної частини електропривода пропорційна кореню квадратному від суми зворотних величин моментів інерції

$$\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2}.$$

При зміні навантаження бурової лебідки (маси бурової колони при спуску чи підйомі) змінюється лише приведений момент інерції другої маси — J_2 . Найменше його значення відповідає підйому гаку, а найбільше — підйому максимальної ваги. При підйомі чи спуску гаку частота вільних коливань Ω_{12} має найбільше значення, а у випадку максимального навантаження — найменше значення. Таким чином, період вільних коливань механічної частини електроприводу бурової лебідки при підйомі чи спуску гаку є найменшим, а для максимальної ваги бурової колони — найбільшим.

Динамічний коефіцієнт, що визначає максимальні (пікові) навантаження механічної частини електропривода $k_\delta = \frac{M_{12, \max}}{M_{12, \text{ср}}}$ є функцією від співвідношення $k_\delta = f(T_1 / T_{12})$. Якщо T_1 / T_{12} змінюється в межах $0,5 \div 2$, то динамічний коефіцієнт k_δ обмежений значеннями $1,5 \div 1,1$ [3, с. 502]. Таким чином, обмеження навантажень в пружній механічній системі, що виникають внаслідок слабо загасаючих коливань, за рахунок зменшення швидкості зростання струму (збільшення часу T_1), є одним з найбільш ефективних шляхів рішення цієї задачі. Для мінімізації коливальних механічних навантажень також необхідно обмежити першу похідну моменту, або другу похідну швидкості $d^2\omega / dt^2$.

Для обґрунтування умов формування перехідних процесів в системі генератор-двигун (Г-Д) в [3, с. 507] рівняння електричної рівноваги якірного кола генератор-двигун розглядається без врахування ЕРС, тобто приймається $L_\Sigma \frac{di_\gamma}{dt} = 0$ (L_Σ — загальна індуктивність якірного кола двигуна). Таким чином, при формуванні перехідного процесу не враховується його перший етап, домінуючим на якому є електромагнітний процес (зміна струму і моменту двигуна, кутова швидкість змінюється в стислих межах), що обумовлює відхилення координат привода від бажаних. Використання багатоконтурних систем підпорядкованого регулювання, дозволяє обмежити ці відхилення, але приводить к значному збільшенню інерційності системи керування.

На рис. 3 показана спрощена структурна схема живлення силової частини перспективного електроприводу системи підйомального агрегату бурової установки ЛБ-650 Е. Силова частина системи побудована по принципу Г-Д із двома двигунами постійного струму незалежного збудження, які включені послідовно поміж собою та генератором. Двигуни працюють на загальний вал, що з'єднаний із барабаном лебідки.

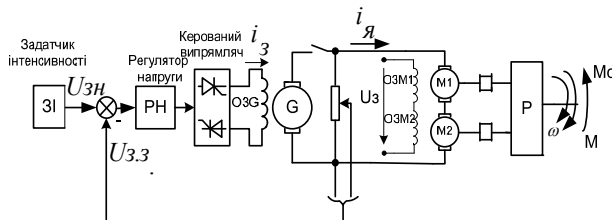


Рис. 3. Схема вмикання дводвигунного приводу лебідки ЛБ-650 Е, G — генератор, $M1, M2$ приводні двигуни приводу лебідки, P — редуктор, U_{3H} — напруга датчика інтенсивності, $U_{3.3}$ — напруга зворотнього зв'язку по напрузі генератора

Розглянемо алгоритм формування оптимальних пускових діаграм в системі керування перетворювач-двигун (КП-Д). Рівняння, що визначають рух системи:

$$\begin{cases} E_c = 2c\omega + R_{я\Sigma} \cdot i_{я} + L_{я\Sigma} \frac{di_{я}}{dt}; \\ M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \end{cases} \quad (3)$$

де E — ЕРС ідеального генератора, c — конструктивна стала двигуна, $R_{я\Sigma}$, $L_{я\Sigma}$ — відповідно, сумарні якорні опір та індуктивність, J_{Σ} — сумарний момент інерції привода.

Система рівнянь (3) відповідає живленню двигунів від ідеального джерела напруги. Розглянемо роботу цього привода, коли напруга U на затискачах двигунів формується у такий спосіб:

$$U = 2c \cdot \omega + i_{я} \cdot R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} \cdot \dot{i}_{я}, \quad (4)$$

де $\dot{i}_{я}(t)$ — функція часу, що визначає бажаний характер зміни першої похідної струму якоря двигуна, $i_{я}$, ω — миттєве значення струму та кутової швидкості. Тобто, рівняння (4) визначає миттєве значення напруги на затискачах двигунів, що забезпечує рух привода із заданою швидкістю зростання струму якоря.

На рис. 4 зображена блок-схема моделювання електропривода бурової лебідки, керування якого виконується у відповідності до запропонованого алгоритму формування керуючого впливу. На цій схемі: РН — регулятор напруги, КП — керований перетворювач, Г — генератор. Об'єкт керування — двигун постійного струму, модель якого визначена системою рівнянь (3). Напруга на затискачах двигуна визначається рівнянням (4) і формується моделлю двигуна. Вхідні змінні суматора, що на вході моделі двигуна, визначаються правою частиною рівняння (4). Сигналом завдання регулятора напруги РН системи Г-Д, яка живить приводні двигуни лебідки, є напруга, сформована його моделлю. Тобто, формування перехідного процесу визначається завданням на швидкість зростання (зменшення) струму якоря двигунів, що дозволяє як обмежити швидкість зростання струму та і його максимальні значення. Перехідний процес є повністю керованим на усіх його етапах.

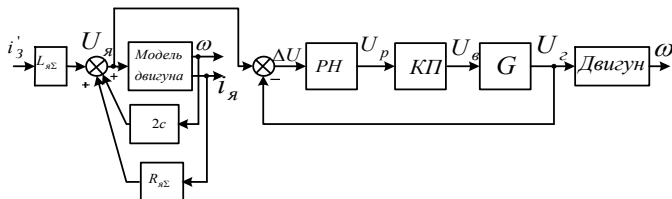


Рис. 4. Блок-схема системи керування електропривода бурової лебідки ЛБ-650 Е

Генератор розглядається як лінійна ланка, а насичення магнітної системи враховується обмеженням вихідної напруги та її максимальним значенням. Тому коефіцієнт підсилення генератора рахується незмінним.

$$\text{Передавальна функція генератора } W_z = \frac{K_z}{T_{3z}p + 1}.$$

Для компенсації інерційності обмотки збудження генератора в системах підпорядкованого регулювання використовуються регулятори напруги, передавальні функції яких визначається формулою:

$$W_{pn} = \frac{T_{3z}p + 1}{T_\mu},$$

де $T_\mu = 0,05$ сек. — мала стала часу. Визначення T_μ є попереднім.

Для живлення обмотки збудження генератора використовується керований випрямляч, який при моделюванні рахуємо безінерційним. Тому його передавальна функція

$$W_{кв} = K,$$

де $K = \frac{U_{3z.max}}{U_{6x.3z.max}} = \frac{100}{10} = 10$ — коефіцієнт підсилення керованого випрямляча, $U_{3z.max}$, $U_{6x.3z.max}$ максимальні вихідна та вхідна напруги випрямляча.

$$\text{Коефіцієнт зворотного зв'язку } K_{3,3} = \frac{U_{6x.3z.max}}{U_{z.max}} = \frac{10}{1000} = 0,01.$$

Розроблена MATLAB-модель дослідження перехідних процесів системи керування електропривода бурової лебідки ЛБ-650 Е і проведена апробація розробленого алгоритму та цієї моделі розрахунку перехідних процесів дводвигунного електроприводу бурової лебідки із двигунами постійного струму з незалежним збудженням П151-5К (номінальні параметри двигунів: потужність $P_n = 320$ кВт, напруга $U_n = 440$ В, струм $I_n = 778$ А, кутова швидкість $\omega_n = 52,36$ 1/с, максимальна швидкість $\omega_m = 104,72$ 1/с).

На рис. 5 приведені розраховані криві залежності у відносних одиницях: першої похідної струму якоря $i'_{я*} = f(t)$, струму $i_{я*} = f(t)$, кутової швидкості $\omega_* = f(t)$, а також відносної динамічної похибки струму якоря приводних двигунів $\Delta i_* = \frac{i_{ям} - i_{я}}{i_{ям}}$, де $i_{ям}$ — струм якорного кола моделі двигунів бурової лебідки.

Відносні значення змінних визначалися у наступний спосіб: $i'_{я*} = i'_я / 4000$, $i_{я*} = i_я / i_{ян}$, $\omega_* = \omega / \omega_0$, де $i_{ян} = 778 \text{ A}$ — номінальний струм якоря двигуна, $\omega_0 = 54,4 \text{ 1/c}$ — кутова швидкість руху приводу без навантаження.

Керування перехідним процесом здійснюється за рахунок наступної зміни сигналу завдання (рис. 5 крива i') — першої похідної струму якоря двигуна. На першому проміжку часу $0 \leq t \leq 0,38 \text{ c}$ перша похідна струму якоря була задана $i'_я = 4000 \text{ A/c}$. Фактична швидкість зміни струму якоря (середня) двигунів за результатами моделювання дорівнює $1520/0,38=4000 \text{ A/c}$ (початкове значення струму двигуна 0 A , остаточне — 1520 A). На другому проміжку часу $0,38 \leq t \leq 2,55$ $i'_я = 0$ і струм якоря залишався постійним, тобто $i_я = 1520 \text{ A}$. На третьому проміжку часу ($2,55 \leq t \leq 2,625 \text{ c}$) $i'_я = -4000 \text{ A/c}$, струм якоря зменшувався від 1520 A до 1320 A , швидкість зміни струму $(1520 - 1320) / (2,55 - 2,625) = -2700 \text{ A/c}$. Це обумовлено великою інерційністю системи Г-Д. Максимальна динамічна похибка (відхилення струму якоря двигуна від струму моделі) на цих інтервалах дорівнює 131 A , або у відносних одиницях $0,2$. Максимальне відхилення струму якоря від сталого його значення 1520 A при пуску дорівнює 10 A ($1530 - 1520 = 10 \text{ A}$), або $0,66\%$.

Таким чином, керування електроприводом постійного струму з незалежним збудженням за рахунок запропонованої зміни сигналу завдання — першої похідної струму якоря двигуна дозволяє здійснювати керування електроприводом на всіх етапах пуску: на I етапі, коли визначальним є електромагнітний перехідний процес, тривалість процесу та швидкість зростання струму визначаються значеннями постійного вхідного сигналу завдання — першої похідної струму якоря; на II етапі, коли домінуючим є механічний перехідний процес і рух приводу (розгін з постійним прискоренням) $i'_я = 0$; на III етапі, коли домінуючими є і електромагнітний, і механічний перехідні процеси, швидкість зменшення струму якоря двигуна задається значення сигналу завдання – першої похідної $i'_я = -4000 \text{ A/c}$. Особливо важливим є те, що перехідні процеси формуються практично з нульовим перерегулюванням як по струму, так і по швидкості.

Розглянемо як змінюється напруга живлення. Напруга на затискачах моделі двигунів змінюється стрибком на початку кожного етапу перехідного процесу. Цей стрибок дорівнює $\Delta U = \pm L_{я\Sigma} \cdot i'_3 = 15,6 \text{ B}$. На початку перехідного процесу ($t = 0$) стрибок $\Delta U = L_{я\Sigma} \cdot i'_3 = 15,6 \text{ B}$. В

момент часу $t = 0,38$ с стрибок $\Delta U = -L_{я\Sigma} \cdot i'_3 = -15,6$ В, при $t = 2,55$ с знову $\Delta U = -15,6$ В, $t = 2,625$ с — 15,6 В. Цей стрибок системою керування напруги відпрацьовується з помилкою в часі.

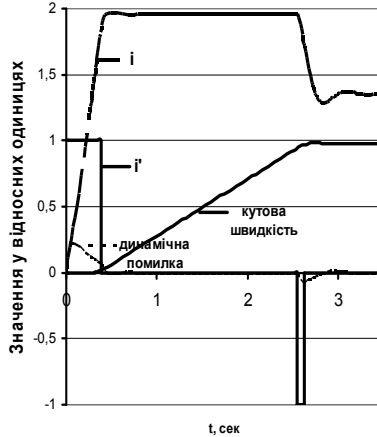


Рис. 5. Результати розрахунку перехідного процесу пуску системи електропривода бурової лебідки ЛБ-650 Е з двигунами П-151-5 К із $M_c = 16710$ Нм (при максимальній вазі бурової колони)

На підставі проведених досліджень може бути запропонований наступний алгоритм формування перехідних процесів.

1. За рівняннями 1, 2 визначається період вільних коливань механічної частини привода.
2. Задаємося динамічним коефіцієнтом $k_\theta = \frac{M_{12\max}}{M_{12cp}}$, та визначаємо час зростання T_1 струму якоря до максимально-припустимого струму I_{\max} при пуску.
3. Визначаємо першу похідну струму якоря $i'_я = \frac{I_{\max}}{T_1} = i'_3$.
4. Тривалість першого етапу пуску $t_1 = T_1$ с, другий етап пуску відбувається на протязі зростання напруги живлення до номінального значення. Перша похідна струму на цьому етапі $i'_я = 0$.
5. Третій етап відбувається з $i'_я = -i'_3$, його тривалість дорівнює

$$t_3 = \frac{I_{\max} - I_c}{i'_{зад.}}$$

де I_c — струм статичного навантаження.

6. Перехідний процес завершується при роботі привода на природній механічній характеристиці $u = U_{ном}$.

Запропонований алгоритм керування не обмежується завданням постійного значення першої похідної струму якоря. В цій системі можливо відтворювати любий характер зміни завдання — значення першої похідної струму, що забезпечує бажаний характер зміни струму та моменту двигуна, тобто дозволяє мінімізувати як коливальні електричні, так і механічні навантаження системи.

Висновки

1. Розроблений алгоритм формування керуючого впливу (напруги на затискачах двигунів постійного струму з незалежним збудженням) мінімізує під час пуску перенавантаження: механічні в редукторах і талевій системі та електродинамічні в якріному ланцюгу. Це дає змогу:
 - а) на першому етапі пуску регулювати швидкість зростання струму до сталого значення, тобто час зростання струму якоря двигунів T_1 є керованим, що дозволяє обмежити коливальні механічні навантаження в механічній системі електропривода;
 - б) обмежити коливальні перенавантаження в електричній частині привода. Перерегулювання струму якоря двигунів електроприводу дорівнює приблизно 1%.
2. Розроблена MATLAB Г-модель дослідження перехідних процесів пуску двигунів постійного струму з незалежним збудженням;
3. Проведені дослідження перехідних процесів пуску двигунів бурової лебідки ЛБ 650 Е.

Список використаних джерел:

1. Коропец П. А. К вопросу оценки тяговых свойств привода локомотива. Повышение эффективности и качества работы электроподвижного локомотива / П. А. Коропец, Н. И. Горбунов // Межвузовский тематический сборник Ростовского института инженеров жел.-дор. тр-та. — 1984. — Вып. 176. — С. 21–29.
2. Карпенко В. Н. Формування керуючого впливу пуску двигуна постійного струму з послідовним збудженням / В. Н. Карпенко, Н. С. Нікорюк // Зб. наук. праць. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, 2011. — Вип. 5. — С. 99–108.
3. Чиликин М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. — М. : Энергия, 1979. — 616 с.
4. Карпенко В. Н. Концепция построения главного привода подъемного агрегата буровой установки 6 класса с лебедкой ЛБ-650Е / В. Н. Карпен-

ко, В. А. Эсауленко, Н. С. Никорюк // Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія “Електротехніка і енергетика”. — Донецьк : ДонНТУ, 2007. — Вип. 7/128. — С. 279–284.

In the robot the system of automatic control in supply voltage on clips of the engine of a direct current with independent excitement in transitional modes of start-up is considered. The developed algorithm of formation of tension allows to receive the demanded law of change of the first derivative of the moment $dM / dt = Jd^2\omega / dt^2$ of the engine that provides restriction dynamic loadings in elements of kinematic links.

Key words: *the drilling rig, system of the elevating unit, the electric drive, G-D system, the engine, start-up, tension on engine clips, management of tension change.*

Отримано: 15.10.2012

УДК 330.101

М. Отелбаев, д-р физ.-мат. наук, профессор,

Е. Н. Сейткулов, канд. физ.-мат. наук

Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева,
г. Астана, Казахстан

ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ГЕОКОСМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Вводится новая математическая модель геокосмического прогнозирования. Изложение материала ограничено простыми дискретными линейными моделями. Важно отметить, что с развитием облачных вычислений и суперкомпьютерных технологий предложенные в статье идейные методы реализуемы на практике.

Ключевые слова: *методы прогнозирования, математическая модель, циклы солнечной активности, облачные вычисления.*

Постановка проблемы. В методах научного прогнозирования немаловажную роль играет вопрос «полноты» входных данных или, как говорят, исходные данные какого-либо процесса. Например, в проблеме экономического прогнозирования важно уметь определять ключевые параметры экономических показателей, которые в совокупности представляли бы целостную картину об этом процессе. Это очень сложная, порой неразрешимая, задача. Действительно, если мы с полной уверенностью знаем, что некоторый процесс полностью описывается ограниченным числом параметров и эти параметры являются известными, то вопрос прогнозирования превращается в чисто математическую и/или техническую задачу. То есть вся проблема сводится к выбору исходных данных процесса, которые исчерпывающе описывали бы этот процесс. Сейчас среди математических исследований имеется достаточно много