

УДК 004.942:62-83

## СТВОРЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ АГРЕГАТІВ НАФТОГАЗОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

В.С.Костишин, П.О.Курляк

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 8(03422) 48003

e-mail: p\_kurlyak@ukr.net

*Предложен междисциплинарный подход для программного моделирования энергетических характеристик сложных электротехнических систем нефтегазовой промышленности на основе метода Bond Graph и лицензионной программы имитационного моделирования 20-sim 3.6 07 Professional. Создана компьютерно-ориентированная модель электроприводного агрегата, с помощью которой проведено исследование пускового режима электродвигателя.*

*The interdisciplinary approach for the programmed modeling of the energy characteristics of the complex electro-technical system in oil and gas industry is offered on the basis of the Bond Graph's method and licensed program of the simulation 20-sim 3.6 07 Professional. The created computer oriented model of the electric drive aggregate due to which the starting regime of the electric engine was researched.*

**Постановка проблеми.** Впровадження сучасних енергозберігаючих режимів електроприводного обладнання нафтогазової промисловості неможливо уявити без його моделювання та проектування засобами обчислювальної техніки. В процесі створення та дослідження таких технічних систем перш за все виникає проблема вибору формальної моделі їх представлення. На даному етапі розвитку математичного моделювання актуальним є синтез ефективних комп'ютерно-орієнтованих моделей електроприводних агрегатів (ЕА), до складу яких входили б нерозривно сполучені між собою пристрої різної фізичної природи. Відсутність таких моделей призводить в свою чергу до значних проблем при аналізі режимів роботи ЕА, особливо коли необхідно врахувати нелінійні характеристики структурних елементів та їх взаємодію. Прикладами таких агрегатів є будь-які електроприводи насосів, лебідок, вентиляторів, повітрорудок тощо, які використовують у нафтогазовій промисловості.

**Аналіз результатів останніх досліджень.** На сьогоднішній день у світовій практиці досить рідко застосовують комплексний підхід для дослідження та комп'ютерного моделювання ЕА як системи загалом. Традиційно складові пристрої ЕА моделюють окремо різними методами, тому процес дослідження динамічних режимів роботи електроприводів стає надто трудомістким. Крім того, аналіз літературних джерел засвідчив, що спеціалізовані для одних підсистем (доменів) методи комп'ютерного моделювання не дають задовільних результатів для інших і не дають змоги провести повне уніфіковане дослідження системи загалом.

**Завдання досліджень.** Метою роботи є впровадження міждисциплінарної методології та інструментів програмного моделювання режимів роботи ЕА для синтезу їх комп'ютерно-орієнтованих моделей.

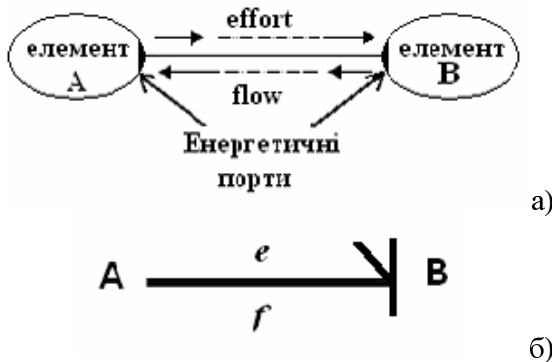
**Виклад основного матеріалу.** Для підвищення ефективності функціонування ЕА необхідно створювати сучасні комп'ютерно-орієн-

товані моделі, здатні адекватно відображати складні фізичні процеси енергообміну між складовими елементами ЕА. В результаті подальшого дослідження таких моделей стає можливим створення алгоритмів оптимального керування усталеними та перехідними процесами, що протікають в ЕА.

Відзначимо, що з позицій системного підходу ЕА слід представляти як складну систему, що складається з декількох підсистем різної фізичної природи (електричної, механічної, гідравлічної тощо). Для дослідження таких мехатронних систем [1] існує декілька методів моделювання, а саме: метод багатополосників (Multipoles); метод блочних діаграм (Block Diagrams); метод об'єктних діаграм (Object Diagrams) та метод графів зв'язків (Bond Graphs). Одним з найефективніших методів із даного переліку є уніфікований метод моделювання Bond Graph, який дає змогу досліджувати динамічну поведінку мультидомених ЕА, використовуючи єдину систему понять та позначень. За допомогою встановлених причинно-наслідкових зв'язків він забезпечує можливість комп'ютерного формування системних рівнянь, перевірку правильності синтезу моделей і подає у графічній формі наочний опис складних систем. На відміну від інших методів застосування Bond Graph призводить до візуалізації не тільки сигнальних, але й енергетичних потоків. Метод Bond Graph, запропонований Пейнтером [2] та розроблений його учнями Кернопом і Розенбергом [3], і сьогодні розвивається бурхливими темпами. Для прикладу, лідер світового літакобудування фірма "BOEING" використовує цей метод для створення та моделювання режимів складних надсучасних літальних апаратів. Однак слід зазначити, що для реалізації цього перспективного методу необхідно мати ліцензовану комп'ютерну програму моделювання (наприклад CAMP-G, SYMBOLS 2000, 20-sim тощо), на придбання якої потрібні чималі кошти. Крім того, за винятком раритетної роботи [4], на теренах колиш-

ного Радянського Союзу практично взагалі відсутні публікації, присвячені методу Bond Graph.

Мультидоменні системи зображують методом Bond Graph у вигляді позначених і напрямлених графів, в яких вершини являють собою підмоделі, а стріли символізують взаємодію між їхніми енергетичними портами. Такі сполучення називають енергетичними зв'язками (bonds), їх зображують суцільною лінією (рис. 1). Енергетичний зв'язок виражає ідеальний потік енергії між двома сполученими підмоделями. Він представлений двостороннім сигнальним потоком енергетично-спряжених змінних зусилля (effort) та потоку (flow). Поняття енергетичного порту було введено Велером [5] для електричного контура і розширене Пейнтером [2] для інших фізичних областей. Під енергетичним портом розуміють контактну точку підмоделі, яку з'єднують ідеальним зв'язком. Позитивний напрям потоку енергії між елементами системи та причинно-наслідкові зв'язки між енергетично-спряженими змінними позначають відповідно половиною стріли та перпендикулярним штрихом на кінці зв'язку.



а) роз'яснення основних графічних позначень методу Bond Graph  
б) умовне графічне позначення

Рисунок 1 — Умовні графічні позначення в методі Bond Graph

Для опису мультидоменних систем методом Bond Graph застосовують змінні зусилля ( $e$ ), потоку ( $f$ ), інерції ( $p$ ), зміщення ( $q$ ), потужності ( $P$ ) та енергії ( $E$ ). Встановлені [6], [7] такі базові співвідношення між цими змінними:

1)  $e(t)$ ,  $f(t)$  – відповідно величина зусилля та потоку, добуток яких дає миттєву потужність  $P(t)$ , що протікає між двома портами. У динамічній системі зусилля і потік змінюються, отже і потужність змінюється в часі

$$P(t) = e(t)f(t), \quad (1)$$

2)  $p(t)$  – величина інерції, рівна інтегралу по часу від зусилля

$$p(t) = \int_{t_0}^t e(t)dt = p_0 + \int_{t_0}^t e(t)dt, \quad (2)$$

3)  $q(t)$  – величина зміщення, яку визначають як інтеграл часу від змінної потоку

$$q(t) = \int_{t_0}^t f(t)dt = q_0 + \int_{t_0}^t f(t)dt, \quad (3)$$

4)  $E(t)$  – величина енергії, що передається через порт елемента і яку визначають, як інтеграл часу від потужності  $P(t)$

$$E(t) = \int_{t_0}^t P(t)dt = \int_{t_0}^t (e(t)f(t))dt. \quad (4)$$

В таблиці 1 наведені узагальнені та спеціалізовані для різних доменів змінні, які використовують у методі Bond Graph.

Метод Bond Graph для опису будь-якої мультидоменної системи використовує стандартний набір із дев'яти елементів [2]. Їх можна поділити на три категорії: однопортові, двопортові та багатопортові елементи. Зображують елементи комбінацією букв (мнемонічними кодами), вказуючи на вид елемента. Дані елементи згідно з фізичною природою поділено на п'ять груп:

- 1) джерел (граничних умов) –  $Se$ ,  $Sf$ ;
- 2) збереження (відповідно до закону збереження енергії) –  $I$ ,  $C$ ;
- 3) незворотного перетворення (теплової дисипації енергії в довкілля) –  $R$ ;
- 4) двостороннього зворотного перетворення (взаємозв'язки між підсистемами) –  $TF$ ,  $GY$ ;
- 5) розподілу (взаємозв'язки в межах підсистеми) –  $0$ ,  $1$ .

До першої групи відносять однопортові активні елементи  $Se$ – та  $Sf$ –типу.  $Se$  – це джерело зусилля, яке прикладене до інших елементів системи, в той час як  $Sf$  – джерело потоку, напрямленого в цю систему.

До другої групи відносять однопортові пасивні енергозберігаючі елементи  $C$ – та  $I$ –типу, які резервують всі види вільної енергії. Накопичення вільної енергії характеризують двома типами змінних  $q$ – і  $p$ –типу, які є змінними стану системи.

В елементах  $C$ –типу в результаті надходження до них потоку  $f$  із мережі накопичуються змінні  $q$ –типу. Охарактеризувати такий процес можна диференціальним рівнянням балансу, яке утворює першу частину системи конструктивних рівнянь (6) зберігаючого елемента. В іншій частині цієї системи рівнянь змінна стану  $q$  пов'язана із зусиллям  $e$ . Дане співвідношення залежить від виду зберігаючого елемента

$$\left. \begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= f, \\ e &= \varphi(q). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Аналогічно в елементах  $I$ –типу дія зусилля  $e$  призводить до накопичення змінних

Таблиця 1 – Відповідність змінних методу Bond Graph, змінним різних доменів

Узагальнені змінні	Домен	Механічний (поступального руху)	Механічний (обертowego руху)	Електричний	Гідрравлічний
Зусилля, $e$		Сила, $F$	Обертвий момент, $P$	Напруга, $U$	Тиск, $p_s$
Потік, $f$		Швидкість, $v$	Кутова швидкість, $\omega$	Струм, $I$	Об'ємна витрата, $Q$
Величина інерції, $p$		Момент, $M$	Кінетичний момент, $H$	Потокощеплення, $\lambda$	Момент тиску, $M_p$
Величина зміщення, $q$		Зміщення, $X$	Кут переміщення, $\theta$	Заряд, $q_e$	Об'єм, $V$

$p$ -типу. Цей процес описується системою конструктивних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= e, \\ f &= \varphi(p). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Необхідно відзначити, що коли в двох видах зберігаючих елементів поміняти місцями роль зусилля і потоку, то  $C$  – і  $I$  – елементи поміняються місцями. Це так звана подвійна (дуальна) форма елементів.

До третьої групи відносять однопортовий пасивний елемент  $R$ -типу, який відображає дисипацію вільної енергії у довкілля. Конструктивним рівнянням даного елемента є алгебраїчне співвідношення між зусиллям і потоком

$$e = Rf. \quad (8)$$

До четвертої групи відносять два двопортові пасивні елементи перетворення енергії-трансформатор  $TF$  та гіратор  $GY$ , які служать для відображення зв'язку між підсистемами однієї або різної фізичної природи.

В ідеальному трансформаторі  $TF$  енергія не зберігається і не розсіюється, а лише перетворюється. Внаслідок такого перетворення, зусилля трансформуються в зусилля, а потоки в потоки. Такий перетворювач характеризується тільки одним безрозмірним параметром  $n$  – коефіцієнтом трансформації, який є необхідним для опису трансформації зусиль і потоків

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= ne_2, \\ f_2 &= nf_1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Прикладом такого елемента є трансформатори струму та напруги в електричній мережі.

Гіратор  $GY$  представляє перетворення енергії між різними фізичними областями. Прикладом такого перетворювача є електричний двигун, насос, турбіна тощо. Охарактеризувати дане перетворення можна гіраторним зв'язком за допомогою рівняння

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= rf_2, \\ e_2 &= rf_1. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

На відміну від коефіцієнта трансформації, коефіцієнт гірації  $r$  має фізичну розмірність, оскільки він відображає відношення між зусиллям і потоком.

До п'ятої групи відносять багатопортові елементи розподілу, які характеризують зв'язки між вищезазначеними елементами в межах однієї підсистеми. Існують два види таких зв'язків, а саме: 0 і 1-сполучення.

0-сполучення описують першим законом Кірхгофа. Воно представляє вузол, в якому всі зусилля сполучених елементів є рівними між собою. Прикладом такого сполучення є паралельний зв'язок в електричному колі. За законом збереження енергії алгебраїчна сума потоків сполучених елементів рівна нулю. Енергетичний напрям (тобто напрям половини стріли) визначають за напрямом потоків.

1-сполучення описують другим законом Кірхгофа. Воно володіє властивостями послідовного сполучення в електричному колі, в якому всі потоки сполучених елементів є рівні, а енергетичний напрям визначають за напрямом зусиль.

У випадку моделювання нелінійних елементів системи до позначення вищезазначених основних елементів додають літеру  $M$  (модульований елемент). Вона символізує те, що конструктивні рівняння таких елементів залежать від зовнішнього сигналу.

Графічні позначення дев'яти найпростіших елементів представлені в таблиці 2.

Bond Graph моделюванням (симулюванням) ЕА займаються чимало вчених. Зокрема, Гранда та Реус [8] досліджували систему двигун постійного струму (ДПС) – вантаж із зубчастою передачею, використовуючи програму моделювання САМР-G. Амеороген [9],[10],[11] та Брідвельд [12] розглядали систему ДПС-вантаж із пасовою передачею за допомогою програми 20-sim. Ці автори вивчали не силові, а швидкісні характеристики, хоча з точки зору енергетичного підходу, нехтування силовими характеристиками неприпустиме. Отже, взявши за основу результати моделювання вказаних авторів, проведемо дослідження як швидкісних, так і силових характеристик ЕА за допомогою ліцензованої програми 20-sim 3.6 07 Professional, отриманої в рамках договору про співпрацю з лабораторією автоматизованого керування інституту мехатроніки електротехнічного факультету Нідерландського університету Твене. Ця програма складається з двох основних вікон і великої кількості інструментів. Перше вікно –

Таблиця 2 — Графічні позначення елементів методу Bond Graph

Основні елементи методу Bond Graph		Графічне позначення
Однопортові активні елементи	$Se$ – джерело зусилля (effort)	$Se \longrightarrow  $
	$Sf$ – джерело потоку (flow)	$Sf   \longrightarrow$
Однопортові пасивні елементи	$I$ – елемент	$I \longrightarrow  $
	$C$ – елемент	$  \longrightarrow C$
	$R$ – елемент	$  \longrightarrow R$ $\longrightarrow   R$
Двопортові елементи	$TF$ – трансформатор	$  \longrightarrow TF   \longrightarrow$ $\longrightarrow   TF \longrightarrow$
	$GY$ – гіратор	$\longrightarrow   GY   \longrightarrow$ $  \longrightarrow GY \longrightarrow$
Багатопортові елементи	0 – сполучення	$\longrightarrow   0 \longrightarrow$ $\uparrow$
	1 – сполучення	$\longrightarrow   1 \longrightarrow$ $\uparrow$

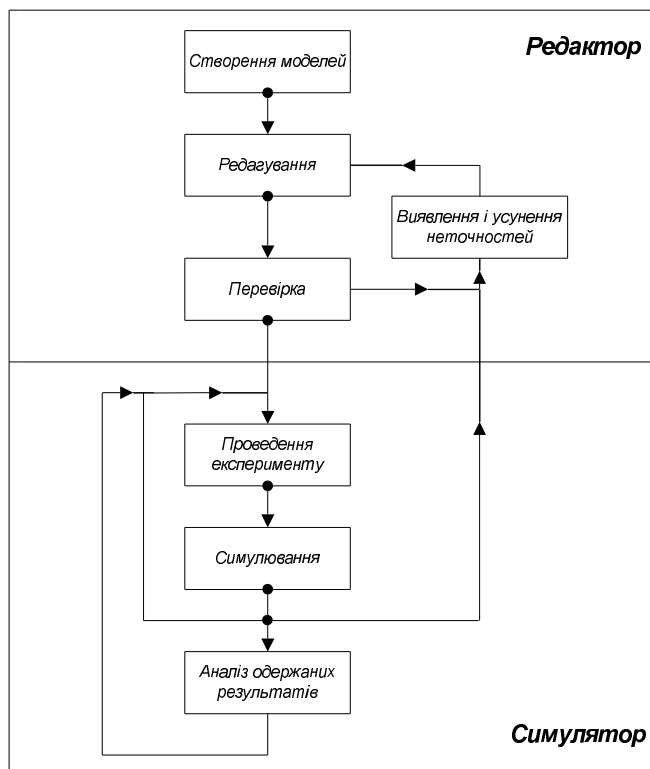


Рисунок 2 — Блок-схема структури програми 20-sim

„Редактор”, друге – „Симулятор”. Вікно „Редактор” використовують для введення і редагування моделей, „Симулятор” – для моделювання і аналізу отриманих результатів. Структуру програми можна наочно описати за допомогою

блок-схеми (рис. 2). Після створення і редагування моделі програма проводить її автоматичну перевірку, а за допомогою набору інструментів користувач встановлює параметри основних елементів моделі та експерименту.

Таблиця 3 – Числові значення елементів Bond Graph моделі ЕА

Елемент Bond Graph моделі ЕА	Умовне графічне позначення	Числові значення
<b>Генератор енергії:</b> - амплітуда вихідного сигналу; - початковий час	<i>SignalGenerator1</i>	$1A$ $1c$
<b>Двигун постійного струму:</b> - індуктивний опір обмоток; - активний опір обмоток; - гіратор; - інерція валу двигуна; - опір механічного тертя валу двигуна у підшипниках	$L_a$ $R_a$ $k_m$ $J_m$ $R_m$	$0,00002 \text{ Гн}$ $0,1166 \text{ Ом}$ $0,292 \text{ В} \times \text{с/рад}$ $0,00262 \text{ кг} \times \text{м}^2/\text{рад}$ $0,0001 \text{ Н} \times \text{с/м}$
<b>Пасова передача:</b> - трансформатор 1; - трансформатор 2; - гнучкість пасу	$TF_1$ $TF_2$ $C_{belt}$	$0,25$ $1$ $0,648 \text{ м/Н}$
<b>Вантаж:</b> - інерція вантажу; - опір тертя вантажу	$J_l$ $R_l$	$0,056 \text{ кг} \times \text{м}^2/\text{рад}$ $0,1152 \text{ Н} \times \text{с/м}$

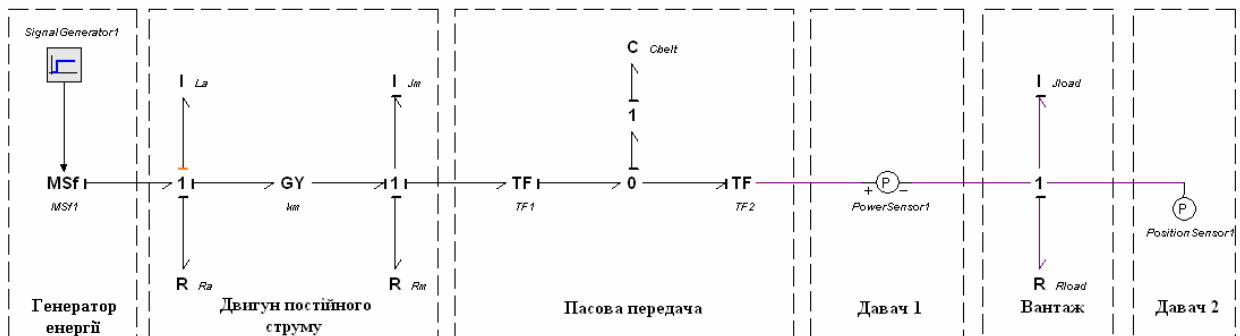


Рисунок 3 — Bond Graph модель ЕА

Розглянемо ЕА, який складається з ДПС, редуктора та вантажу. Системи такого типу використовують у нафтогазовій промисловості на бурових установках (бурова лебідка, ротор тощо). Досліджуваний ЕА можна умовно поділити на дві підсистеми – електричну і механічну, кожна з яких ділимо на підмоделі, з яких вони складаються. Так, в електричній підсистемі виділяємо підмодель генератора енергії та підмодель ДПС. В механічній – підмодель редуктора, підмодель вантажу та підмоделі двох датчиків – позиції та потужності, що передається вантажу. Кожна підмодель являє собою бінапрямлений граф, який складається із комбінації дев'яти вищезгаданих найпростіших елементів (рис. 3).

Підмодель ДПС поділимо на елементи, які виражають такі фізичні поняття (рис. 3):

$L_a$ ;  $R_a$  – відповідно індуктивний та активний опір обмоток електродвигуна;

$GY$  – гіраторний зв'язок між електричною та механічною підсистемами з коефіцієнтом гірації  $k_m$ ;

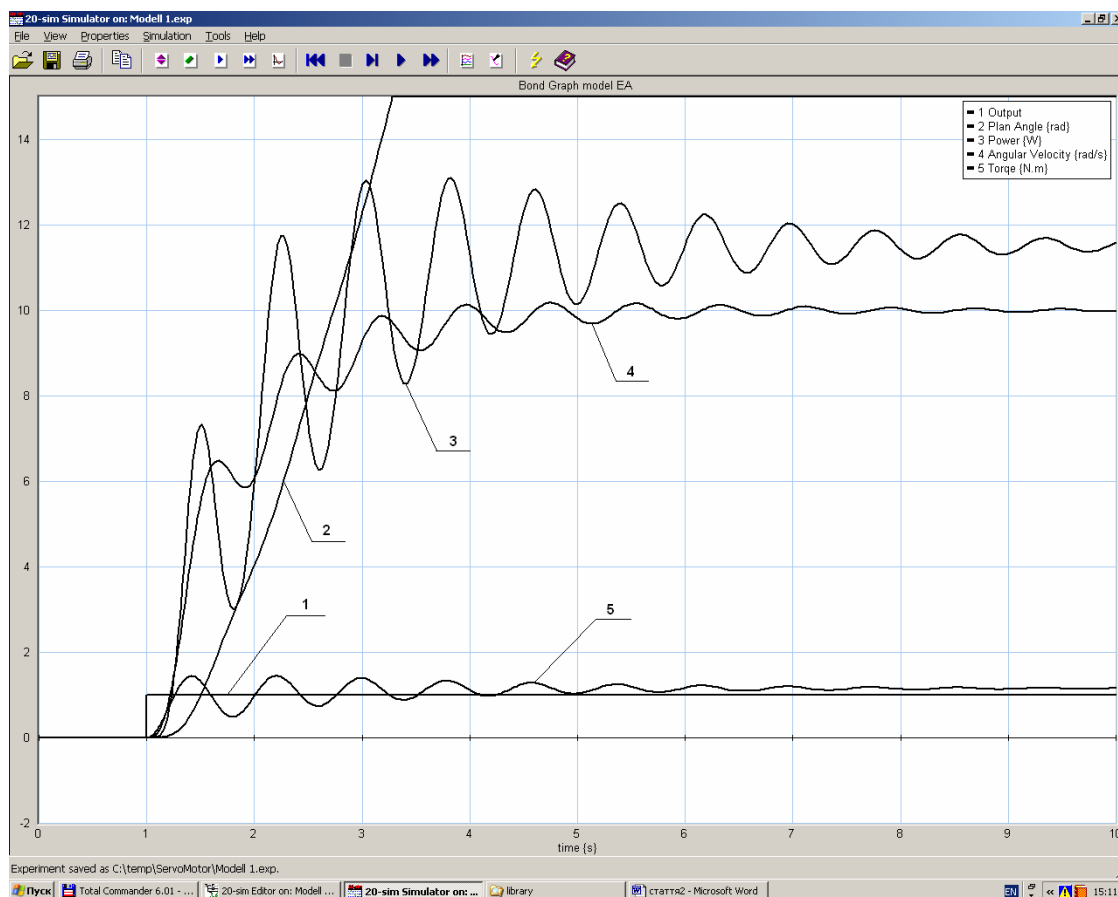
$J_m$ ;  $R_m$  – відповідно інерція та опір механічного тертя вала двигуна.

Оскільки через послідовно сполучені  $L$ ,  $R$  – елементи електричного домена двигуна протікає однаковий струм, то енергетичний зв'язок між ними представлений 1-сполученням. Аналогічну картину маємо і для механічного домена, де  $J_m$ ,  $R_m$  – елементи мають однакову кутову швидкість обертання.

Підмодель редуктора пасової передачі представлено у вигляді двох перетворювачів  $TF_1$ ,  $TF_2$ , 0-, 1-сполученням та  $C$ -елементом. Трансформатори  $TF_1$ ,  $TF_2$  описують перетворення у шківках механічної енергії обертового руху в енергію поступального руху і навпаки.  $C$ -елемент відображає гнучкість пасу.

Вантаж зображено елементами інерції ( $J_{load}$ ) та опором тертя ( $R_{load}$ ).

Між собою підмоделі підсистем (доменів) з'єднані енергетичними зв'язками і таким чином отримана комп'ютерно-орієнтована Bond Graph модель системи ЕА, що реалізована за допомогою програми 20-sim (рис. 3). Числові значення складових елементів моделі наведені в таблиці 3.



1 – вихідний сигнал генератора енергії; 2 – кут “розгону” вантажу; 3 – потужність, яка передається вантажу; 4 – кутова швидкість обертання; 5 – обертовий момент на валу

Рисунок 4 – Результати дослідження часових характеристик Bond Graph моделі EA

На рисунку 4 зображено отримані в результаті комп'ютерного моделювання силові та швидкісні характеристики EA. Знайдено залежності вихідного сигналу генератора енергії, кута “розгону”, кутової швидкості, обертового моменту та потужності, яка передається вантажу від часу запуску системи тривалістю 10 секунд.

**Висновки.** Створено та проаналізовано комп'ютерно-орієнтовану модель EA, для якої проведено дослідження динамічного режиму роботи. Під час проведення симуляційних досліджень встановлені такі результати:

1) аналіз отриманих швидкісних характеристик (1;2;4) системи EA (рис. 4) підтвердив їх добрий збіг з отриманими в [9] результатами досліджень;

2) одержано нову силову характеристику системи EA (5) (рис. 4);

3) одержано нову енергетичну характеристику системи EA (3) (рис. 4).

Запропоновано комплексний підхід до моделювання складаних технічних систем нафтогазової промисловості, до складу яких входять підсистеми різної фізичної природи на основі методу Bond Graph та ліцензованої програми імітаційного моделювання 20-sim 3.6 07 Professional.

### Література

1. Bishop R.H. The mechatronics hand book, The University of Texas at Austin // ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, CRC Press, – Boca Raton, London, New York, Washington, D.C. – 2002. – 654 p.
2. Paynter H.M. Analysis and Design of Engineering Systems // The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts. – 1961. – 268 p.
3. Rosenberg R.C., Karnopp D.C. Introduction to physical system dynamics // McGraw Hill, New York, NY. – 1983. – 176 p.
4. Кэрноп Д.С., Розенберг Р.С. Применение теории графов связей в технике: Перевод с английского. – М.: Мир, 1974. – 94 с.
5. Wheeler H.A. and Dettinger D. Wheeler Monograph 9. – 1949. – 326 p.
6. Thoma, J.U. Simulation by Bondgraphs: Introduction to a Graphical Method // Springer-Verlag, Berlin, 1990.
7. Karnopp D.C., Margolis D.L. and Rosenberg, R.C. System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems // 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, – 2000. pp. 36-52.
8. Granda J., Reus J. New Developments in Bond Graph modeling software tools: the computer aided modeling program CAMP-G and MATLAB // The 1997 IEEE International Conference on

Systems, Man, and Cybernetics Hyatt Orlando, Orlando, Florida, USA – October 12-15 1997. pp. 42-68.

9. Amerongen J. van. Modelling, Simulation and Controller Design for Mechatronic Systems with 20-sim 3.0 // Cornelis J. Drebbel Research Institute for Systems Engineering and Control Laboratory, Electrical Engineering Department, University of Twente, – 2003. pp.68-75.

10. Amerongen J. van. Mechatronic design // Drebbel Research Institute for Systems Engineering and Control Laboratory, Faculty of Electrical Engineering, University of Twente, Mechatronics 13, – 2003. pp. 1045-1066.

11. Amerongen J. van, Breedveld P. Modelling of Physical Systems for the Design and Control of Mechatronic Systems // INFAC Professional Brief, published in relation to the 15th triennial INFAC World Congress, International Federation of Automatic Control, Laxenburg, Austria, – 2002. pp. 1-56 .

12. Breedveld P.C. Bond Graph-Physicals systems modeling: Fundamental concept // Institute for Mechatronics and Control Engineering Laboratory, Electrical Engineering Department, University of Twente, Netherlands, Summerschool Bertinoro 7-11 July 2003.