

УДК 681.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-93-102

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА ОСНОВІ МЕТОДУ СТРУКТУРНИХ СХЕМ

**В. С. Борин, М. І. Козутяк, М. М. Кучак*

Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. +380 (342) 72-71-67, e-mail: kafatp@ukr.net

Проведено аналіз сучасних методів графічного зображення систем автоматичного регулювання (САР). Графічний аналог оперативного управління є цінним на етапі пізнання характеру і логіки зв'язку між елементами управління, зручний на етапі перетворення управління, що змінюють наочними структурними перетвореннями, і створює основу для вирішення рівнянь сучасними методами машинної автоматики. Графічний аналог оперативного управління відображає систематизацію математичних операцій перетворення сигналу, що є основним недоліком застосування цього методу в інженерній практиці, так як він немає фізичного розуміння реальних ланок системи. Для даного етапу порівнювали наступні методи графічного зображення (САР): «Метод функціональних схем», - відображає фізичні зв'язки між реальними елементами САР що визначають функціональні і енергетичні перетворення сигналів. Цей метод застосовують на першому етапі аналізу САР. «Метод структурних зображень», - показує графічні зображення системи диференціальних рівнянь, що описують дану САР, де елементи не відображають реальних ланок ні об'єктів, ні математичних еквівалентних реальних ланок. «Метод структурних схем». Під методом структурних схем слідує розуміння сукупності динамічних ланок САР, що відображають в найбільш зручній формі взаємозв'язків, умовами передачі і перетворення сигналів управління і регульованих величин між ними. Основна перевага застосування структурних схем закладається в тому, що вони дозволяють просто оцінити суттєві зв'язки між елементами в САР, а отже, і вплив параметрів на перехідний процес. Представлено переваги та недоліки методу структурних схем. Необхідно підкреслити, що структурна схема на основі типових динамічних ланок повинна розглядатися не як ілюстрація до рівняння, що описує САР, а як досить зручний і наочний спосіб складання рівнянь системи по рівняннях окремих ланок. Значна увага приділена застосуванню структурних схем для зображення системи механічних ланок. Докладно представлені способи з'єднання механічних ланок. Наведено загальне правило побудови структурної схеми n – масової механічної системи.

Ключові слова: система автоматичного регулювання, функціональна схема, структурне зображення, структурна схема, динамічна ланка, механічна ланка, рядна система, багаторядна система.

Проведен анализ современных методов графического изображения систем автоматического регулирования (САР). Графический аналог оперативного управления является ценным на этапе познания характера и логики связи между элементами управления, удобен на этапе преобразования управления, меняют наглядными структурными преобразованиями, и создает основу для решения уравнений современными методами машинной автоматики. Графический аналог оперативного управления отражает систематизацию математических операций преобразования сигнала, является основным недостатком применения этого метода в инженерной практике, так как у него нет физического понимания реальных звеньев системы. Для данного этапа сравнивали следующие методы графического изображения (САР): «Метод функциональных схем», - отражает физические связи между реальными элементами САР определяющие функциональные и энергетические преобразования сигналов. Этот метод применяют на первом этапе анализа САР. «Метод структурных изображений», - показывает графические изображения системы дифференциальных уравнений, описывающих данную САР, где элементы не отражают реальных звеньев ни объектов, ни математических эквивалентных реальных звеньев. «Метод структурных схем». Под методом структурных схем следует понимание совокупности динамических звеньев САР, отражающие в наиболее удобной форме взаимосвязей, условиями передачи и преобразования сигналов управления и регулируемых величин между ними. Основное преимущество применения структурных схем закладывается в том, что они позволяют просто оценить существенные связи между элементами в САР, а следовательно, и влияние параметров на переходный процесс. Представлены преимущества и недостатки метода структурных схем. Следует отметить, что структурная схема на основе типовых динамических звеньев должна рассматриваться не как иллюстрация к

уравнение, описывающее САР, а как довольно удобный и наглядный способ составления уравнений системы по уравнениям отдельных звеньев. Значительное внимание уделено применению структурных схем для изображения системы механических звеньев. Подробно представлены способы соединения механических звеньев. Приведено общее правило построения структурной схемы n - массовой механической системы.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, функциональная схема, структурная изображения, структурная схема, динамическая звено, механическая звено, однорядная система, многорядная система.

The analysis of modern methods of graphic representation of systems of automatic regulation (SAR) is carried out. The graphical analogue of operational control is valuable at the stage of learning the nature and logic of communication between control elements, convenient at the stage of control transformation, changing visual structural transformations, and creates a basis for solving equations by modern methods of machine automation. The graphical analogue of operational control reflects the systematization of mathematical operations of signal conversion, which is the main disadvantage of this method in engineering practice, as it has no physical understanding of the real parts of the system. For this stage, the following graphic imaging (SAR) methods were compared: "Functional circuit method" - reflects the physical relationships between the real elements of SAR that determine the functional and energy transformations of signals. This method is used in the first stage of SAR analysis. "Structural imaging method" shows graphical representations of a system of differential equations that describe a given SAR, where the elements do not reflect the real parts of either objects or mathematically equivalent real parts. "Method of structural schemes". . The method of structural diagrams follows the understanding of a set of dynamic units of the SAR, reflecting in the most convenient form of the relationship, the conditions of transmission and conversion of control signals and adjustable values between them. The main advantage of the use of structural schemes is that they allow you to simply assess the significant relationships between the elements in the SAR, and hence the impact of parameters on the transition process. The advantages and disadvantages of the method of block diagrams are presented. Considerable attention is paid to the use of structural diagrams to depict the system of mechanical components. Methods of connecting mechanical links are presented in detail. The general rule of construction of the structural scheme of n - mass mechanical system is given.

Key words: automatic control system, functional scheme, structural image, structural diagram, dynamic link, mechanical link, multiple system, multi-system.

Вступ

Система автоматичного регулювання (САР) складається з елементів, що взаємодіють між собою. Через елементи системи управління та по лініях зв'язку проходять керуючі сигнали і впливи, викликаючи зміни регульованих величин. Обернені зв'язки можуть бути як природніми, так і штучними. Природні обернені зв'язки виникають через природні елементи, що складають систему, або через способи з'єднання цих елементів і не можуть бути виключені з системи, а штучні вводяться для корекції характеристик елементів системи або самої системи для отримання необхідних показників регульованого процесу.

Аналіз умов проходження сигналів через елементи системи управління являється одним із фундаментних питань теорії автоматичного управління. При цьому виявляється ступінь впливу обернених зв'язків на показники системи, можливість ідеалізації системи для розрахунків шляхом відкидання природних зв'язків і спрощення фізичних елементів, а

також умови введення штучних зв'язків і вибір їх необхідних параметрів.

Задача аналізу проходження і перетворення сигналу в системі в теорії САР вирішується декількома способами, що мають одну і ту ж вихідну базу – аналітичне описання суті процесів, що відбуваються, в виді системи диференціальних рівнянь.

Вирішивши диференціальне рівняння системи, можна знайти характер зміни регульованої величини. Для знаходження диференціального рівняння системи необхідно мати диференціальне рівняння для окремих ланок, ділянок. Вирішенням системи отриманих диференціальних рівнянь, виключаючи проміжні змінні, можна отримати диференціальне рівняння системи, хоча це є достатньо важким процесом.

Метод, що використовує вхідну систему керування, відноситься до найбільш ранніх і основних методів теорії регулювання. Однак він втратив наочність в практичних інженерних розрахунках і користується великою працею.

Використання цього методу в інженерній практиці потребує вільного володіння

математичним апаратом як класичної форми запису диференційних рівнянь, так і алгебраїчної. Крім того, при використанні цього методу втрачається фізичне уявлення про природі досліджуваних фізичних елементів.

Постановка задачі дослідження

Як показав досвід проектних і налагоджуваних робіт приводів підйомних установок великої продуктивності, коли необхідно, не втрачаючи фізичного уявлення про реальні ланки, складає чітке уявлення про вплив параметрів обернених зв'язків, цей метод практично не застосовується.

В даний час існує наступні методи графічного зображення САР при їх аналізі.

Метод функціональних схем відображає фізичні зв'язки між реальними елементами САР, що визначають функціональні і енергетичні перетворення сигналів. Блоками, ланками такої схеми являється реальні об'єкти або вузли. Цей метод застосовують на першому етапі аналізу САР.

Метод структурних зображень показує графічні зображення системи диференційних рівнянь, що описують дану САР спуско-підйомної установки, де елементи не відображають реальних ланок ні об'єктів, ні математичних еквівалентних реальних ланок.

Графічне зображення системи диференційних рівнянь дає наочність в розумінні послідовного використанні математичних операцій, що спрощує вирішення управління на ЕОМ.

Графічний аналог оперативного управління є цінним на етапі пізнання характеру і логіки зв'язку між елементами управління, зручний на етапі перетворення, що змінюють наочними структурними перетвореннями, і створює основу для вирішення рівнянь сучасними методами машинної автоматики.

Графічний аналог оперативного управління відображає систематизацію математичних операцій перетворення сигналу, що є основним недоліком застосування цього методу в інженерній практиці, так як він немає фізичного розуміння реальних ланок системи.

Графічний аналог оперативного управління також абстрагований, як і його вихідна система управління. Крім того, в деяких випадках із системи диференціальних рівнянь важко

виділити суттєві і несуттєві зв'язки і провести групування елементів, щоб представити їх комбінацією типових ланок.

Під методом структурних схем слідує розуміння сукупності динамічних ланок САР, що відображають в найбільш зручній (інженерній) формі взаємозв'язків, умовами передачі і перетворення сигналів управління і регульованих величин між ними.

Типові динамічні ланки відповідають реальним фізичним ланкам системи регулювання спуско-підйомної установки бурильних труб. В цьому випадку зберігається безпосередня відповідність між ланками фізичної моделі і її структурним зображенням. Типова ланка тільки в відповідному частотному діапазоні відповідає реальній ланці. Це положення виходить із передумови ідеалізації системи, яка точно описується математично і приблизно характеризує реальні ланки системи в заданому діапазоні частот сигналів.

Типові ланки є направленими ланками, тобто перетворює сигнал в одному напрямку. В цьому випадку виконується умова незалежності передавальних функцій окремих ланок від їх з'єднання.

Необхідно підкреслити, що структурна схема на основі типових динамічних ланок повинна розглядатися не як ілюстрація до рівняння, що описує САР спуско-підйомної установки, а як досить зручний і наочний спосіб складання рівнянь системи по рівняннях окремих ланок.

При складанні структурних схем приймають наступні обмеження для динамічних ланок: по-перше, воно повинно бути направленою дією; по-друге, динамічні ланки, а значить і САР спуско-підйомної установки, повинне описуватися лінійними або лінеаризованим диференційним рівнянням.

Перша умова витікає із головної ідеї уявлення структурних схем. Друге - із умови можливості перетворення структурних схем. Всі види перетворення можна звести до наступного: 1) переміщення вузла сумування через розгалуження; 2) переміщення ланки через розгалуження; 3) переміщення ланки через вузол сумування; 4) переміщення ланки через другу ланку.

Для лінійних систем виконані всі види перетворення. Для нелінійних систем в силу недотримання принципу суперпозиції

(накладання) і комунікативному принципу можна виконати тільки 1-ше і 2-ге перетворення.

Тому застосування методу структурних схем для нелінійних систем не дає того ж результату, що для лінійних: в даному випадку неможливо отримати передавальну функцію системи.

Однак в більшості випадків, застосовуючи метод припасування, можливо не лінійність представити як суму лінійних ланок з різними коефіцієнтами передачі і ланками затримки.

Метод структурних схем розвинений для дослідження лінійних САР, об'єкти яких можуть бути представлені типовими динамічними ланками.

В структурній схемі, що складається з динамічних ланок, велике значення придається способам з'єднання ланок, як основному засобу побудови структурних схем.

Використовуючи різні способи з'єднання типових ланок, можна, комбінуючи окремі ланки, виявити суттєві зв'язки між ними. Особливу увагу слід приділити оцінці впливу несуттєвих зв'язків, які є в елементах, але можуть не враховуватися в структурних схемах.

Основна перевага застосування структурних схем закладається в тому, що вони дозволяють просто оцінити суттєві зв'язки між елементами в САР спуско-підйомної установки, а отже, і вплив параметрів на перехідний процес.

Це особливо наочно проявляється при проведенні пошукових робіт з ціллю виявити структури системи для подальшого аналізу і синтезу. В цьому випадку не явна степінь впливу кожного оберненого зв'язку і як результат – неможна прийняти припущення, що спрощує дослідження.

При застосування в таких випадках звичайних методів знаходження перехідної функції по вихідній системі диференціальних рівнянь виникає необхідність в багатократному рішенні цієї системи при варіації параметрів.

Метод структурних схем полегшує математичне перетворення рівнянь, що описують поведінку елементів і системи в цілому; полегшує отримання передавальної функції для будь-яких двох величин системи шляхом простої згортки структурної схеми.

Стосовно до окремих ланок структурні методи розкривають внутрішню структуру кожної ланки, що сприяє більш явнішому розумінню істини процесів, що в них протікають, і дозволяє правильно підійти до покращення характеристик ланок налагодженням додаткових зовнішніх зв'язків.

Стосовно до системи в цілому, структурні методи дозволяють встановити раціональність структурної схеми з точки зору основної задачі, що покладена на неї, і компенсації діючих на систему збурень.

Структурний метод знайшов широке застосування в практиці моделювання на ЕОМ і полягає в тому, що досліджувана система спуско-підйомної установки набирається по окремих ланках, що відповідають відповідним ланкам структурної схеми в досліджуваній схемі. Набір задач по структурній схемі моделі дає явне уявлення про відповідності величин і параметрів в досліджуваній системі і моделі, що зручно при підборі коректувальних зв'язків.

Такий спосіб дозволяє здійснювати набір задач з поєднанням невеликого числа елементів моделі, відповідних типів ланок направленої дії, з яких зазвичай складається структурна схема САР спуско-підйомної установки буринних труб.

Недоліком застосування структурних схем є та обставина, що коли складена структурна схема елемента або всієї системи, повністю втрачає уявлення про проходження сигналів всередині окремих елементів.

В деяких випадках складання структурної схеми пов'язано з великими труднощами і може бути зроблено тільки на основі детального аналізу вихідних диференціальних рівнянь системи регулювання. В цьому випадку структурна схема не полегшує знаходження основного рівняння системи, однак вона становиться досить цінною, так як на ній в наглядній формі представлені всі вузли досліджуваної системи і всі існуючі між ними зв'язками. Це виявилось корисним у всіх подальших дослідженнях.

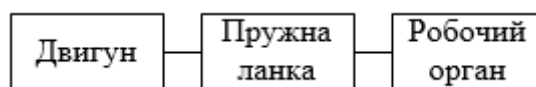


Рисунок 1 – Функціональна схема двигун-робоча машина

На (рис. 1) показана функціональна схема простої системи, що складається з приводного двигуна і робочої машини, робочий орган якого з'єднаний з приводом двигуна за допомогою пружного елемента.

Така проста схема для приводного двигуна постійного струму з незалежним збудженням може бути представлена ідеалізованою фізичною моделлю (рис.2), для якої справедлива система рівнянь:

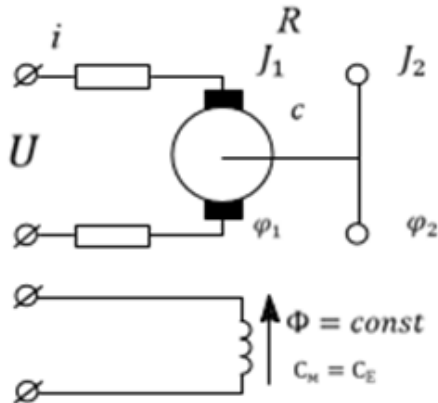


Рисунок 2 – Ідеалізована фізична модель

$$J_1 p^2 \varphi_1 + c(\varphi_1 - \varphi_2) = i c_m;$$

$$J_2 p^2 \varphi_2 - c(\varphi_1 - \varphi_2) = 0;$$

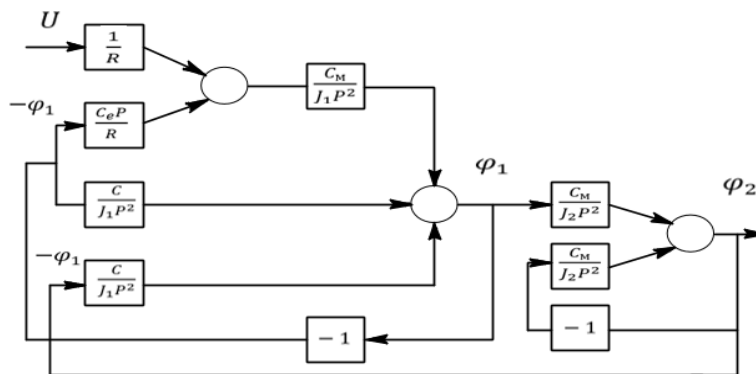


Рисунок 3 – Графічний аналог системи диференційного рівняння фізичної моделі

Вирішивши систему, отримаємо диференціальне рівняння стану ідеалізованої фізичної моделі, яке в загальноприйнятій формі для вирішення на ЕОМ буде мати вигляд:

$$U = iR + c_e p \varphi_1,$$

де φ, i, U – функції оператора $p = \frac{d}{dt}$.

$$\varphi_1 = i \frac{c_m}{J_1 p^2} - \varphi_1 \frac{c}{J_1 p^2} + \varphi_2 \frac{c}{J_1 p^2};$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 \frac{c}{J_2 p^2} - \varphi_2 \frac{c}{J_2 p^2};$$

$$i = \frac{U}{R} - \varphi_1 \frac{c_e p}{R}.$$

Користуючись загальноприйнятими засобами: легко скласти графічний аналог цієї системи (рис. 3).

Як уже сказано, застосування методу структурного аналізу базується на основі представлення будь-якої складної схеми в виді набору динамічних ланок направленої дії як по прямому каналу передачі, так і по каналу оберненого зв'язку. Поняття прямого каналу або каналу оберненого зв'язку залежить від визначення переваги досліджуваних величин системи.

$$p^4 \varphi_2 = U \frac{c_m c}{R J_1 J_2} - \frac{c_m c_e}{R J_1} p^2 \varphi_2 - \frac{c_m c_e c}{R J_1 J_2} p \varphi_2 - \frac{c}{J_2} p^2 \varphi_2 - \frac{c}{J_1} p^2 \varphi_1$$

і його графічний аналог для набору на ЕОМ (рис. 4).

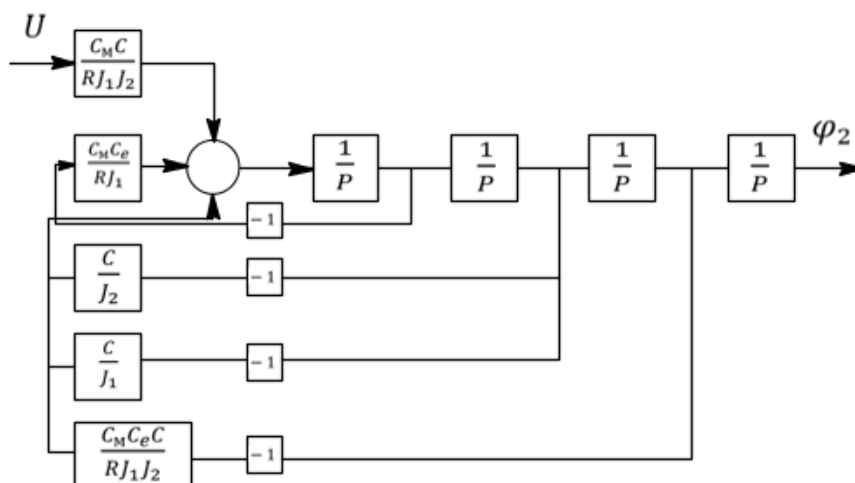


Рисунок 4 – Графічний аналог рівняння набору на ЕОМ

Наприклад, для системи (рис. 5, а) прямий канал передачі представлений в вигляді двох ланок $W_p(p)$ і $W_0(p)$, а канал оберненого зв'язку – ланкою $W_{o,c}(p)$ при дослідженні переваги величин $x_{вх}(p)$, $x_{вих}(p)$ і додаткової величини $f_{ст}(p)$.

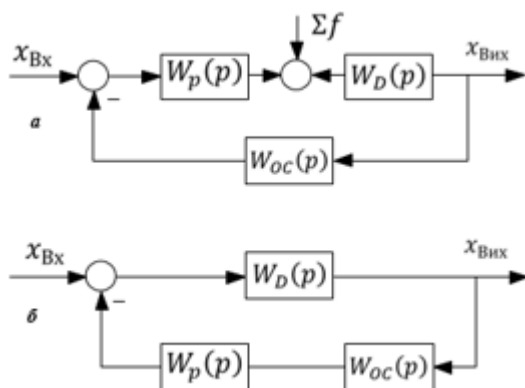


Рисунок 5 – Структурна схема регулювання

Якщо за головні величини прийняти $f_{ст}(p)$ і $x_{вих}(p)$, то структурна схема перетвориться (рис. 5, б), і прямий канал буде представлений ланкою $W_0(p)$, а канал зворотної зв'язку – ланками $W_p(p)$ і $W_{o,c}(p)$.

Поняття ланки направленої дії виходить з того факту, що до потоку енергії, що підходить до ланки, не може приєднатися яка-небудь частина енергії, без додавання додаткового зв'язку, що фіксується на виході ланки. Таким чином, фіксується один напрямок потоку енергії, відсутність взаємного зв'язку з виходом.

В реальних ланках завжди існує зв'язок між контуром вхідної величини і контуром вихідної. Наприклад, в генераторі постійного струму

присутній контур вхідної величини – обмотка якоря, додаткові полюси, компенсаційна обмотка і навантаження. Між контурами існує взаємний зв'язок, що визначається коефіцієнтом взаєміндукції, тому і можливий в часі перехідних режимів взаємний обмін енергії між контурами (відсутній один напрямок).

Однак в існуючих конструкціях електричних машин взаємний вплив контурів досить незначний: доля енергії, що передається наступним контуром в попередній, дуже малий. Тому, відкидаючи слабкий взаємний вплив наступного контуру на попередній, ідеалізуючи систему, отримаємо ланку направленої дії.

Будь-який складний електричний пристрій представлений як багатовимірний об'єкт, в якому протікає декілька процесів, пов'язаних між собою через внутрішні прямі обернені і перехресні зв'язки.

При ідеалізації ланки як багатоконтурну систему, враховуючи ефективність зв'язків, і при відкиданні мало впливаючих (слабких) контурів, враховуючи їх як додаткові, система вироджується в більш просту систему.

Така ідеалізація правомірна в тому випадку, якщо нас цікавить поведінка системи в цілому по будь-яких координатах і ми розглядаємо дану систему як підсистему системи більш високого порядку.

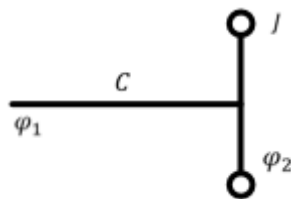
Наприклад, електромашинні підсилювачі для виявлення величини його конструктивних параметрів можна розглядати як багатомірну (багатоконтурну) систему самостійно. Однак при розгляданні системи регулювання немає необхідності розглядати дану систему в її

багатоконтурному зображенні, і тому підсистема наводиться як ідеалізована ланка направленої дії по головних координатах $U_{вх}$ і $U_{вих}$.

Загальновідомий факт, що в системі механічних ланок (виступаючих в ролі робочих машин) вплив передають в різній степені як в прямому, так і в зворотному напрямку по лінії зв'язку передачі впливу.

Тому для можливості застосування методу структурних схем необхідно розглядати властивості елементарної механічної ланки і способи його з'єднання в систему механічних ланок.

Механічна ланка, що складається з пружності і маси (рис. 6), в крутячому режимі при наступних обмеженнях: відсутні дисипативні сили; маси (моменти інерції) приймаються зосередженими; маса (момент інерції) і коефіцієнт жорсткості – незмінні і не залежать від узагальнених координат, статичне навантаження не вказується. Така ланка є ізолюваною механічною ланкою.



J – момент інерції, $кг \cdot м^2$; c – коефіцієнт жорсткості пружинного елемента, $Н \cdot м / рад$; ϕ_1 – кут закручування – вхідна величина, $рад$; ϕ_2 – кут закручування – вихідна величина, $рад$

Рисунок 6 – Схема механічної ланки

Якщо прийняти в якості узагальнених координат кут повороту, на основі рівняння руху Лагранжа II порядку, записуємо:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial p_{\phi}} - \frac{\partial T}{\partial \phi} + \frac{\partial \Pi}{\partial \phi} = M_{\phi}$$

де T – кінетична енергія ланки, Дж; Π – потенціальна енергія деформації пружного елемента ланки, Дж; ϕ , p_{ϕ} – відповідно кут повороту валу (рад) і його похідна, рад/с; M_{ϕ} – узагальнюючий момент, Н·м.

Як відомо,

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial p_{\phi}} = J \frac{d^2 \phi_1}{dt^2}; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \phi_1} = c(\phi_1 - \phi_2); \quad M_{\phi} = 0,$$

Тоді

$$J \frac{d^2 \phi}{dt^2} - c(\phi_1 - \phi_2) = 0.$$

Переходячи до операторного зображення функції при нульових початкових умовах і розглядаючи величину кута ϕ_1 на вході ланки, а ϕ_2 як вихід, отримаємо передавальну функцію ізолюваної механічної ланки:

$$W_y(p) = \frac{\phi_2(p)}{\phi_1(p)} = \frac{c}{Jp^2 + c}.$$

Якщо $T_y = \sqrt{\frac{J}{c}}$ – постійна часу пружної ланки, тоді

$$W_y(p) = \frac{1}{T_y^2 p^2 + 1}.$$

З отриманого виразу бачимо, що ізолювана механічна ланка в структурному відношенні представляє собою консервативну ланку з постійною часу T_y і передавальним коефіцієнтом, рівним одиниці.

Найбільш характерним способом з'єднання механічних ланок в систему є: рядний спосіб (нерозгалужена система) – в системі ланок відсутні вузли розгалуження (рис. 7, а); багаторядний спосіб (розгалужена система) – в системі ланок присутні вузли розгалуження (рис. 7, б).

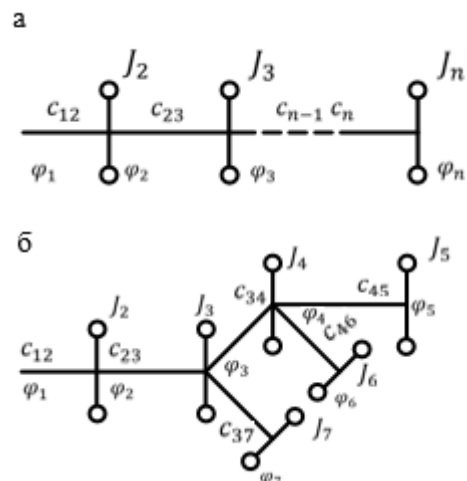


Рисунок 7 – Способи з'єднання механічних ланок
 а – рядний; б – багаторядний;

У вузлах можуть бути маси, а можуть і не бути. Розглянемо отримані передавальні функції і структурну схему для систем механічних ланок.

Розглянемо систему послідовно з'єднаних двох механічних ланок (рис. 8, а).

При обмеженні, аналогічно прийнятих для ізолюваної ланки, отримаємо вираз для кінетичної енергії системи

$$T = \frac{J_1(p\varphi_2)^2}{2} + \frac{J_2(p\varphi_2)^2}{2}$$

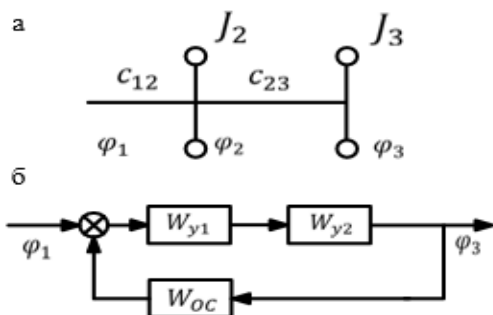
і потенціальної енергії системи:

$$\Pi = \frac{c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} + \frac{c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3)^2}{2}.$$

Звідси, використовуючи рівняння Лагранжа, отримуємо систему рівнянь по узагальненим координатам:

$$J_1 p^2 \varphi_2 - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) = 0;$$

$$J_1 p^2 \varphi_2 - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) = 0.$$



а – фізична модель; б – структурна схема;

Рисунок 8 – Рядна система двох ланок

Знайдемо відношення φ_3/φ_1 , що представляє по відповідній передавальній функції розглянутої механічної ланки, що складається з двох послідовно з'єднаних ланок:

$$W_y(p) = \frac{\varphi_3(p)}{\varphi_1(p)} = \frac{c_{12}c_{23}}{(J_1 p^2 + c_{12})(J_2 p^2 + c_{23}) + J_2 c_{23} p^2}.$$

Якщо:

$$T_{y1} = \sqrt{\frac{J_1}{c_{12}}}; \quad T_{y2} = \sqrt{\frac{J_2}{c_{23}}}$$

$$W_{y1} = \frac{1}{T_{y1}^2 p^2 + 1}; \quad W_{y2} = \frac{1}{T_{y2}^2 p^2 + 1};$$

$$W_{oc} = \frac{J_2}{c_{12}} p^2.$$

З передавальної функції ізолюваних механічних ланок і деяких зворотних зв'язків, отримуємо передавальну функцію системи:

$$W_y(p) = \frac{W_{y1} W_{y2}}{1 + W_{y1} W_{y2} W_{oc}},$$

якій відповідає структурна схема (рис. 8, б).

Як бачимо, при з'єднанні механічних ланок в систему і зображення її в вигляді структурної схеми з'являються зворотні зв'язки, що відображають якраз той відомий факт, що механічна система не володіє направляючою дією.

Зворотній зв'язок відображає фізичний процес передачі енергії через пружні елементи від дії зосереджених мас до точки дії. Такі зв'язки називаються природними на відміну від штучних.

При з'єднанні електричних ланок, які володіють напрямленою дією, в систему ланок, така система не породжує зворотних зв'язків, так як немає суттєвих зворотних взаємодіючих між собою ланок. Аналогічно для системи, що складається з трьох послідовно з'єднаних механічних ланок (рис. 9, а), отримано передавальну функцію:

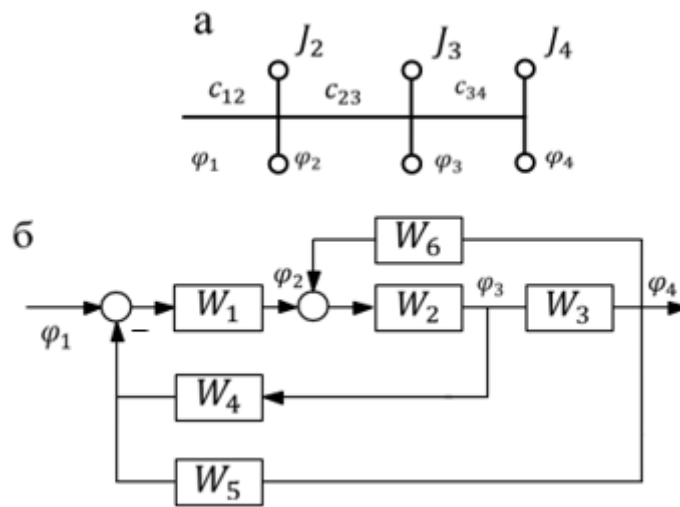
$$W_y(p) = \frac{\varphi_4(p)}{\varphi_1(p)} = \frac{W_1 W_2 W_3}{1 + W_2 W_3 W_6 + W_1 W_2 W_4 + W_1 W_2 W_3 W_5},$$

де

$$W_1 = \frac{1}{T_{y1}^2 p^2 + 1}; \quad W_2 = \frac{1}{T_{y2}^2 p^2 + 1}; \quad W_3 = \frac{1}{T_{y3}^2 p^2 + 1};$$

$$W_4 = \frac{J_2 p^2}{c_{12}}; \quad W_5 = \frac{J_3 p^2}{c_{12}}; \quad W_6 = \frac{J_3 p^2}{c_{23}}.$$

якій відповідає структурна схема (рис. 9, б).



а – фізична модель; б – структурна схема;

Рисунок 8 – Рядна система трьох ланок

Як бачимо, в отриманій структурній схемі трьох механічних ланок (пружність – маса) прямий канал структурної схеми представлений послідовним з'єднанням трьох передавальних функцій ізольованих механічних ланок. Обрані зв'язки відображають взаємодію механічних ланок один з одним.

Аналіз результатів досліджень

Розглянуто методику складання структурної схеми де на вході системи присутня електрична ланка в виді двигуна як джерела збурення.

Така електромеханічна система є найбільш загальною схемою робочих машин спускопідійомної установки.

Для спрощення поставленої задачі розглянуто електромеханічну систему при наявності однієї механічної ланки (рис. 10, а).

Для розглянутої електромеханічної системи можна отримано систему рівнянь:

$$J_1 p^2 \varphi_1 + c(\varphi_1 - \varphi_2) = i c_M$$

$$J_2 p^2 \varphi_2 + c(\varphi_1 - \varphi_2) = 0;$$

$$U = i R_{\text{я}} + c_{\text{е}} p \varphi_1 + L p i,$$

з якої легко отримати передавальну функцію системи

$$W(p) = \frac{\varphi_2(p)}{U(p)} = \frac{W_1 W_2}{p \left[1 + \frac{W_1 W_2 J_2 p^2 R_{\text{я}}}{c_M} (1 + T_M p) \right]^2}$$

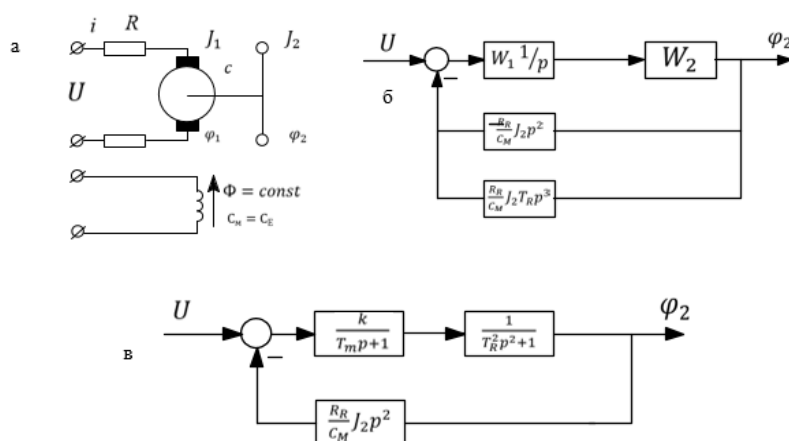
якій відповідає структурна схема (рис. 10, б), де $W_1 = \frac{1}{c_{\text{е}}(T_{\text{я}} T_M p^2 + T_M p + 1)}$ – передавальна функція приводного електродвигуна; $W_2 = \frac{1}{T_{\text{я}}^2 p^2 + 1}$ – передавальна функція ізольованої механічної ланки; $\frac{J_2 p^2 R_{\text{я}}}{c_M}$; $\frac{R_{\text{я}} J_2 T_{\text{я}}}{c_M} p^3$ – зворотні зв'язки електромеханічної системи.

Як бачимо, величина природніх зворотних зв'язків електромеханічної системи, що подаються на вхід, визначаються параметрами якоря двигуна і моментом інерції механічної ланки.

Для двигуна з малим опором якорного ланцюга, тобто з жорсткою характеристикою, вплив механічної ланки буде незначним. Аналогічні висновки можна зробити і для індуктивного якорного ланцюга.

Швидкохідні двигуни мають порівняно менше значення індуктивності, ніж тихохідні, тому і вплив динамічного моменту і зв'язок механічної ланки з ланкою «двигун» будуть значно менше, ніж у тихохідного.

Для двигуна, в якому можна упустити індуктивність якорного ланцюга і увести його аперіодичною ланкою першого порядку, структурна схема спрощується (рис. 10, в).



а – фізична модель; б – структурна схема;

Рисунок 9 – Рядна система трьох ланок

Висновки

Узагальнюючи отримані результати, можна привести загальне правило побудови структурної схеми рядної n -масової механічної системи, що складається відповідно з системи n ланок пружності – маса.

Якщо рядна система складається з системи n з'єднаних послідовних ланок пружності то:

- прямий канал структурної схеми складається з n послідовно з'єднаних передавальних функцій ізольованих механічних ланок з параметрами відповідних ланок пружність – маса;

- з кожного виходу ізольованої ланки на вході всіх попередніх подається загальний від'ємний зв'язок в виді динамічного моменту ланки, помноженого на величину, обернену коефіцієнту жорсткості тієї ланки, на вхід якої попадається цей зв'язок.

В розглянутих системах механічних ланок в якості вхідних координат розглядався кут закручування елемента без визначення природи його виникнення. В реальних механічних системах, що складають робочу машину, джерелом виникнення кута являється двигун з його електромагнітним моментом.

Література

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 167 с.
2. Борин В.С., Козак Ю.В. Автоматизация технологического процесса подготовки природного газа. Материалы международной научно-практической конференции «DIRECTION OF SCIENTIFIC THOUGHT» 2017.
3. Борин В.С., Ониськів О.О. Створення математичної моделі технологічного процесу підготовки газу: Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Молодих учених, аспірантів і студентів -2017» Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. 2017. С.171-172.

References

1. Zade L. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions. M.: Mir, 1976. 167 p.
2. Borin VS, Kozak Yu.V. Automation of the technological process of natural gas preparation. Proceedings of the international scientific-practical conference "DIRECTION OF SCIENTIFIC THOUGHT" 2017.
3. Boryn VS, Onyskiv OO Creating a mathematical model of the technological process of gas preparation: Proceedings of the fourth international scientific-practical conference "Young scientists, graduate students and students -2017" Automation and computer-integrated technologies. 2017. P.171-172.