

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

Методичні вказівки

до виконання практичних робіт з кредитного модуля
«Проектування біотехнічних систем»
для напряму підготовки 6.051402 – «Біомедична інженерія»

Київ
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
2017

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

Методичні вказівки

до виконання практичних робіт з кредитного модуля
«Проектування біотехнічних систем»
для напряму підготовки 6.051402 – «Біомедична інженерія»

Укладачі: професор кафедри біомедичної інженерії **Лебедєв О.В.**,
доцент кафедри біомедичної інженерії **Дубко А.Г.**

ЗАТВЕРДЖЕНО

Вченою радою факультету
біомедичної інженерії
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Протокол № 7 від 27 березня 2017 р.

Київ - 2017

*Гриф надано Вченою радою ФБМІ
(протокол № 7 від 27 березня 2017 р.)*

*Затверджено на засіданні
кафедри біомедичної інженерії
(протокол №11 від 10 березня 2017 р.)*

Навчально-методичне видання

Методичні вказівки

до виконання практичних робіт з кредитного модуля

«Проектування біотехнічних систем»

для напрямку підготовки 6.051402 – «Біомедична інженерія»

Укладачі: професор кафедри біомедичної інженерії **Лебедєв О.В.**,
доцент кафедри біомедичної інженерії **Дубко А.Г.**

Рецензенти: **В.І. Зубчук**, кандидат техн. наук, доцент,
В.І. Коржов, доктор. мед. наук, професор.

За редакцією авторів

Київ -2017

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Теоретичні відомості	7
1.1 Історична оцінка необхідності розробки біотехнічних систем	7
1.2 Закономірності виникнення біоніки	7
1.3 Методи, які підвищують ефективність біонічних досліджень	8
1.4 Біонічний підхід при вирішенні прикладних задач виконаних в останні роки	9
1.5 Метод функціонального моделювання в сучасній біоніці	9
1.6 Сучасний шлях розвитку біоніки	10
1.7 Поняття - біотехнічні системи	10
1.8 Користь від використання біотехнічних систем	11
1.9 Системний підхід до вивчення об'єктів живої та неживої природи	11
1.10 Основні задачі теорії систем	12
1.11 Системний аналіз, як різновид системного підходу до вирішення найбільш складних проблем науки	13
1.12 Поняття(цільова функція; атрибути системи)	13
1.13 Чим характеризується система?	14
1.14 Основна характеристика системи (емерджентність)	14
1.15 Стійкість та неідентичність системи	15
1.16 Теорія систем (теорія формальних математичних моделей)	16
1.17 Математична модель реального явища, об'єкта	16
1.18 Ціль дослідження системи	17
1.19 Ознаки за якими класифікуються БТС	17
1.20 Медичні БТС	17
1.21 Медичні БТС діагностичного типу	18
1.22 Медичні БТС терапевтичного типу	18
1.23 Ергатичні БТС	18
1.24 БТС управління цілісним організмом	19
1.25 Принципи адекватності та єдності при формуванні БТС	25
1.26 Основні функціональні характеристики біотехнічних систем	26
1.27 Ефективність БТС	27
1.28 Надійність БТС	29
1.29 Якість управління в БТС	29
1.30 Біотехнічні проблеми при розробці та дослідженнях нової техніки	30
1.31 Етапи в формуванні та дослідженні БТС	31
1.32 Перший етап формування БТС (біологічний)	31
1.33 Другий етап дослідження БТС (узгодження)	32
1.34 Третій етап дослідження БТС (технічний)	32
1.35 Метод поетапного моделювання БТС	32
1.36 Особливості живого організму, які проявляються при розгляді його як ланки БТС	33
1.37 Рівні взаємодії технічних та біологічних ланок БТС	33
1.38 Кібернетичні функції організму. Ефекторні системи	34
1.39 Метаболічні функції організму	34
1.40 Характер взаємодії технічних та біологічних ланок, які визначають структуру БТС	34
1.41 Особливості формування біотехнічних систем різного призначення	35
1.42 Сучасні методи вивчення біологічних об'єктів, як ланок БТС	35

1.43	Порівняльні еволюційні дослідження, які дозволяють виявити певну етапність в розвитку живих організмів	36
1.44	Методи біоіндикації. Приклади біологічних посередників	37
1.45	Структура біотехнічних систем ергатичного типу	38
1.46	Моделювання ергатичних БТС	39
1.47	Важливий момент моделювання ергатичних БТС – опис взаємодії організму з середовищем (формування акту поведінки)	39
1.48	Аферентний синтез	39
1.49	Ефективність роботи оператора в БТС	40
1.50	Біотехнічний системний підхід в рішенні задачі підвищення ефективності людино-машинних систем	41
1.51	Методи класичної теорії управління для моделювання БТС	43
1.52	Біологічна ланка, яка може бути представленою за допомогою суматора	44
1.53	Основні положення теорії ідентифікації	47
1.54	Функціональна ідентифікація	48
1.55	Структурна ідентифікація	49
1.56	Тестування об'єкта з допомогою сигналів, які дозволяють визначити його передавальну функцію	50
1.57	Методики ідентифікації системи на основі аналізу перехідної функції	51
1.58	Метод простору станів	53
2	Практичні роботи в MATLAB та SIMULINK	56
2.1	Задача поліномів у вигляді вектора рядку	56
2.2	Обчислення коренів поліномів	56
2.3	Множення поліномів	57
2.4	Обчислення значення полінома при заданому значенні змінної	57
2.5	Задача передаточної функції	57
2.6	Задача передаточної функції як раціональної функції змінної	58
2.7	Визначення загальної передаточної функції, що зв'язує послідовне з'єднання двох ланок	58
2.8	Визначення загальної передаточної функції, що зв'язує паралельне з'єднання двох ланок	59
2.9	Визначення передаточної функції замкнутої системи з одиничним зворотнім зв'язком	60
2.10	Визначення стійкості системи за характеристичним поліномом	62
2.11	Обчислення полюсів передаточної функції	63
2.12	Вказання розташування полюсів і нулів передаточної функції на комплексній площині	64
2.13	Визначення стійкості системи керування	65
2.14	Аналіз якості роботи системи	66
2.15	Аналіз найпростішого елемента структурної схеми – підсилювача та його блока Gain в SIMULINK	68
2.16	Аналіз елемента структурної схеми – суматора та його блока Sum в SIMULINK	71
2.17	Аналіз елемента структурної схеми – диференційної ланки та її блока Derivative в SIMULINK	72
2.18	Аналіз елемента структурної схеми – інтегруючої ланки та її блока Integrator в SIMULINK	73
2.19	Аналіз елемента структурної схеми – передаточної функції та її блока Transfer Fcn в SIMULINK	74
2.20	Аналіз елемента структурної схеми – ланки запізнювання та її блока	

	Transport Delay в SIMULINK	75
2.21	Дослідження роботи блоків Derivative, Integrator, Transport Delay, Variable Transport Delay в SIMULINK	76
2.22	Створення системи автоматичного регулювання	77
	Література	79

Вступ

Метою практичних робіт з дисципліни «Проектування біотехнічних систем» є формування у студентів здатностей до проектування біотехнічних систем, розрахунку та моделюванню основних їх вузлів, розробці сучасних медичних технологій. Набути практичні навички роботи по використанню пакету прикладних програм МАТЛАБ та SIMULINK. Наводиться опис основних функцій програм. Для виконання практичних робіт необхідно попередньо ознайомитися з програмами і особливостями моделювання у їх середовищі. В першому розділі наведено теоретичні відомості з теорії біотехнічних систем. В другому розділі наведені приклади для виконання практичних робіт, з необхідними коментарями та поясненнями.

1 Теоретичні відомості

1.1 Історична оцінка необхідності розробки біотехнічних систем

Постановка науково-технічної задачі аналізу і синтезу біотехнічних систем була обумовлена необхідністю розробки загальної теорії комплексування технічних і біологічних елементів в єдиному контурі управління. Вперше ця проблема виникла у зв'язку з необхідністю вирішення міждисциплінарних прикладних задач, пов'язаних з розробкою автоматизованих систем штучного кровообігу і дихання, систем заміщення втрачених функцій гемодіалізу, створенням біокерованих протезів кінцівок. Початок цих робіт відносяться до кінця п'ятдесятих і шестидесятих років і пов'язано, в основному, з діяльністю (П.А. Куприянова, Ф.В. Баллюзека, А.П. Колесова, Н.М. Амосова, В.А. Лещука, В.М. Ахутина, А.П. Матвеева, К.Ю. Аграновского, В.С. Гурфинкеля, Н.Е. Кобриского) і керованих ними працівників.

Дещо пізніше, на початку сімдесятих років, були поставлені нові завдання по застосування біонічної методології до розробки адаптивних біотехнічних систем ергатичного типу, а також біотехнічних систем, управління цілеспрямованою поведінкою живих організмів (В.М. Ахутин, Г.С. Неймарк, В.О. Островский, Н.С. Соломенко, Л.Г. Воронин, Г.Б. Агарков, Б.И. Цияко, М.М. Хананашвили та інш.). Наукові дослідження по використанню системного підходу при створенні комплексів «людина - техніка» досить успішно розвиваються школою (Б.Ф. Ломова, В.Ф. Венды, В.П. Зинченко, П.Я. Шлаена, А.А. Крылова та інш.). Таким чином (проблема біотехнічних систем відображає одну з найважливіших сторін науково-технічної революції – об'єднання та консолідацію вчених і фахівців точних і біологічних наук.

1.2 Закономірності виникнення біоніки

У своїй основі синтез біотехнічних систем використовує біонічну методологію і тому не випадково в 1974 р. офіційні «права громадянства» біотехнічні системи отримали саме від фахівців, які займаються біонікою.

Методологія біоніки будується на діалектичному методі пізнання. Відомо, що таким великим досягненням науки, як оптична лінза, хімічні джерела електрики, закон збереження і перетворення енергії, основи аеродинаміки, принципи ехолокації і багато інших, людство зобов'язане у своїй основі глибокому вивченню живих організмів і явищ

у живій природі. Однак, незважаючи на те, що людство намагається відтворити досягнення живої природи з часів далекої давнини, біоніка як наука виникла лише тепер, в 60-ті роки XX століття. Закономірність виникнення біоніки саме в наш час обумовлюється наявністю трьох факторів, дія яких найбільш яскравим стало тепер.

Першим з них є гостра потреба в тісній взаємодії, обміні досвідом, науковою інформацією та ідеями представників біологічних і технічних наук при вирішенні завдань, властивих цим наук.

Другою причиною об'єднання стала необхідність вирішення завдань, що стоять на межі цих наук, таких, наприклад, як: протезування органів; об'єктивний контроль стану організму людини в умовах космічних польотів або глибоководних занурень; інженерно-психологічне проектування систем «людина - машина» та інш.

Третім фактором стало те, що саме до середини XX століття були вже накопичені певні знання в області вивчення структури функціонування живих організмів, а також розроблені основні методи їх вивчення, з одного боку, а з іншого, з'явилася наукова і технічна база, необхідна для постановки цих досліджень. Яскравим прикладом тому є задача дослідження апарату орієнтації летючої миші. Вивчення цієї проблеми, метою якої була розробка технічних пропозицій щодо компенсації втраченого зору у людей, пов'язана з ім'ям італійського вченого Ладзаро Спалланцани, який працював у кінці XVIII століття. Однак по-справжньому якісно локаційний апарат кажана був досліджений лише нашими сучасниками після того, як в їх розпорядженні виявилася вимірювальна та реєстраційна апаратура, необхідна для постановки експерименту з ультразвуковими полями.

1.3 Методи, які підвищують ефективність біонічних досліджень

Особливо важливим для підвищення ефективності біонічних досліджень виявилось вдосконалення методів математичної статистики, формальної логіки, теорії ігор і операцій, теорії інформації, теорії керованого експерименту, а також технічної бази біонічних досліджень і, в першу чергу, розвиток мікроелектродної техніки, розробка мініатюрних датчиків-перетворювачів, технічні досягнення бездротової біотелеметрії і, звичайно, поява на озброєнні біоніки електронних обчислювальних машин різного призначення.

1.4 Біонічний підхід при вирішенні прикладних задач виконаних в останні роки

Дослідження провідних колективів у низці передових країн, які виконані в останні роки, підтвердили особливу ефективність біонічного підходу при вирішенні прикладних інженерних задач на найактуальніших напрямках техніки: роботобудуванні, створенні програм штучного інтелекту, розробці транспортних засобів, вирішенні завдань медичного протезування та приладобудування.

Характерним для біонічного підходу є дослідження саме тих особливостей будови та функціонування живого організму, які необхідні і достатні для рішення конкретних задач синтезу систем певного призначення.

1.5 Метод функціонального моделювання в сучасній біоніці

Сучасна біоніка відкинула принцип сліпого копіювання, некритичного відтворення живої природи в технічних аналогах і прийняла метод функціонального моделювання, що базується на вимогах ізоморфізму технічних систем їх біологічним аналогам, так, наприклад, теорія аеродинаміки, розроблена (Н.Е. Жуковским), виявилася єдиною продуктивною для створення літальних апаратів, у той час як спроби послідовників Леонардо да Вінчі, присвятити свої праці копіюванню пташиного крила, не привели до прогресу в повітроплаванні. Сьогодні те ж можна сказати і про біонічні підходи в роботобудуванні. Наприклад, ті, хто намагаються створювати промислові роботи небіоничним шляхом, не здатні піднятися вище завдання автоматизації верстатних ліній з жорстким обмеженням програмами. І навпаки, синтез інтегральних роботів, здатних збирати та аналізувати інформацію про зовнішнє середовище, приймати рішення і керувати своєю поведінкою в досить складній реальній обстановці, цілком можливий і продуктивний на базі функціонального моделювання сенсорних і ефекторних систем живого організму. Блискучим прикладом тому є розробка робота, призначеного для збору і передачі на землю візуальної інформації про марсіанський ландшафт, виконаного під керівництвом Л. Сутра і У. Калмера на базі моделі нервової системи людини, розробленої У. Маккалоком.

1.6 Сучасний шлях розвитку біоніки

Розвиток біонічної методології пішло в останні роки по шляху переходу від вивчення елементів біологічних систем до більш складних досліджень їх комбінацій, зв'язків і взаємодії. З передрікання Джона Бернала¹,^(1 Бернал Дж. Наука в истории общества. М., 1956. 736 с.) підходимо до кінця тієї фази в історії науки, яка обмежувалася вивченням природи і її закономірностей, в новій фазі, що нині починається повинні бути відкриті закони можливих комбінацій елементів мислення і матеріальних елементів. Дійсно, в останні роки перед біонікою виникли принципово нові завдання щодо вивчення властивостей біологічних об'єктів з метою їх адекватного сполучення з технічними пристроями в єдині біотехнічні системи.

Ця проблема була сформульована як синтез біотехнічних систем і вимагала розробки своєї теоретичної бази і специфічної методології. Це питання, у зв'язку з його новизною, поки ще не знайшов достатньо широкого висвітлення в літературі. Цікаво відзначити, що про необхідність виникнення біотехнічних систем писав ще в 1964 р. Норберт Вінер: «... у наш час ми гостро потребуємо в об'єктивному вивченні систем, що включають і біологічні, і механічні елементи. До оцінки можливостей цих систем не можна ставитися упереджено, тобто з позиції механістичного або антимеханістического спрямування. Я думаю, що такі дослідження вже почалися і що вони дозволять краще зрозуміти проблеми автоматизації»² (² Вінер Н. Творець і робот. М., 1966, с. 83.). В той час вже почалися перші роботи зі створення біотехнічних систем на базі біонічних досліджень: біокеровані протези рук і автоматизовані системи штучного дихання і кровообігу.

1.7 Поняття - біотехнічні системи

Біотехнічні системи – це особливий клас великих систем, що представляють собою сукупність біологічних і технічних елементів, пов'язаних між собою в єдиному контурі управління. Виходячи з цього визначення випливає, що незважаючи на відмінність цільових функцій, до біотехнічних систем в однаковій мірі відносяться як системи ергатичного типу, в яких людина виконує роль керуючого ланки, так і технічні системи, що управляють організмом людини (наприклад, штучне дихання, кровообіг і т. д.) і цілими популяціями живих організмів (біотехнічні системи примусового управління поведінкою тварин). Спільність цих видів біотехнічних систем носить далеко не формальний характер. Неодмінною умовою їх оптимального функціонування є загальні

для них принципи адекватності узгодження «управлінських» характеристик технічних і біологічних елементів системи і принцип ідентифікації інформаційного середовища, що вимагає оптимізації інтенсивності потоків та форми пред'явлення інформації, якої у процесі функціонування обмінюються технічні та біологічні елементи системи.

Іншими словами, в процесі синтезу біотехнічної системи режими функціонування та конструктивні рішення технічних елементів повинні бути вибрані таким чином, щоб максимально відповідати морфологічним та психофізіологічним особливостям сполучаємих з ними біологічних елементів системи.

1.8 Користь від використання біотехнічних систем

Сьогодні вже проведені перші роботи, на підставі результатів яких може бути зроблено дуже серйозний висновок на користь біотехнічних систем: у ряді випадків, особливо при необхідності аналізу значних обсягів інформації (наприклад, при розпізнаванні образів) і прийнятті рішень у реальному масштабі часу, ефективними виявляються не повністю автоматичні комплекси, а біотехнічні системи, в яких поєднується штучний інтелект машини з інтелектом людини-оператора, тобто системи зі змішаним інтелектом. На частку ЕОМ випадає попередня обробка інформації та перетворення її до вигляду, адекватного сенсорним входам людини. Ці елементи біотехнічної системи ми назвали логічними фільтрами-перетворювачами, які в ергатичних системах виконують роль блоку узгодження агрегатів (під агрегатами в даному випадку розуміємо зовнішнє середовище і організм людини).

1.9 Системний підхід до вивчення об'єктів живої та неживої природи

У складних кібернетичних системах, призначених для підтримки фізіологічних умов існування організму зростають вимоги до об'єктивності результатів медико-біологічних досліджень.

Мінливість та індивідуальний розкид параметрів об'єктів, їх взаємопов'язаність, нелінійність цих зв'язків, наявність значних перешкод – все це робить завдання об'єктивної оцінки стану біологічного об'єкта дуже складною. Для того щоб розібратися у величезній інформації, що надходить від об'єкта, що досліджується, необхідно чітко розуміння особливостей біологічного об'єкта, його структури й законів функціонування. Знання особливостей біологічних об'єктів необхідно при вирішенні багатьох задач, таких, наприклад, як діагностика захворювань і вибір лікувальних заходів, контроль за станом

важкохворих і питання реабілітації після тривалих лікувань, управління порушеними функціями організму за допомогою штучних органів і створення біоуправляємих роботів-маніпуляторів, підтримку життєдіяльності організму в екстремальних умовах і оцінка професійної придатності, оптимізація систем «людина-машина» та пов'язане з цим вивчення поведінки людини-оператора і т. д.

Вивчення особливостей біологічного об'єкта пов'язане з подоланням значних труднощів. Це пояснюється, з одного боку, надзвичайною складністю організму, що представляє собою сукупність багатьох взаємопов'язаних фізіологічних систем, а з іншого, недосконалістю методів дослідження та математичного апарату, що не дозволяє адекватно описати таку сукупність. У зв'язку з цим біологічний об'єкт дослідження повинен характеризуватися з більш загальних методологічних позицій. В якості однієї з них може виступати системний підхід, який є методологією наукового дослідження і практичного освоєння складноорганізованого об'єкта.

У цьому випадку на перше місце ставиться не аналіз складових частин об'єкта як таких, а його характеристика як певного цілого, розкриття механізмів і зв'язків, що забезпечують цілісність об'єкта.

Дослідження з загальної теорії систем тривають вже більше чверті століття. Системний підхід вже завоював міцні позиції в дослідженнях найбільш складних типів систем – соціологічних, економічних, біологічних і т. д., а усвідомлення його загальнонаукового характеру призвело до того, що методологія системного підходу до аналізу таких систем стала предметом, в свою чергу, спеціального теоретичного вивчення.

Вже в 40-і роки і пізніше стало ясно, що неможливо створювати скільки небудь складні комплекси без розробки методології системного проектування, тобто розгляд об'єкта як великої системи або як елементу складної системи. Наприклад, по відношенню до системи забезпечення безпеки польотів система диспетчерської служби, система навігації, система організації ремонтної служби, система медичного забезпечення можуть розглядатися як її елементи.

1.10 Основні задачі теорії систем

Основними завданнями теорії систем можна вважати:

- розробку засобів і способів представлення досліджуваних об'єктів як систем;
- побудова узагальнених моделей системи і моделей різних властивостей системи;
- дослідження концептуальної структури системних теорій.

1.11 Системний аналіз, як різновид системного підходу до вирішення найбільш складних проблем науки

Відомі також різновиди системного підходу до дослідження найбільш складних проблем науки, наприклад системний аналіз – аналіз проблем з позицій системного підходу, що допомагає зв'язати між собою всі відомі факти та взаємозв'язки, які становлять зміст аналізованої проблеми, і створити узагальнену модель, що відображає цю проблему з максимально можливим ступенем повноти. Системний аналіз може бути використаний як при постановці і розв'язанні нових проблем, так і при вивченні вже існуючих об'єктів, у тому числі створених природою і людиною. Він допомагає досліднику глибше зрозуміти особливості організації живих систем.

При розробці нових систем, особливо біотехнічних, у яких біологічний об'єкт включається в якості однієї з ланок, велике значення набуває системний синтез – синтез систем з позицій системного підходу, що дозволяє на підставі вихідних даних (які включають відомості про призначення системи, її характеристики і функції), знання елементної бази і досвіду проектування подібних систем запропонувати узагальнену модель системи, що відповідає поставленим завданням з максимально можливим ступенем відповідності при обмеженнях на вибір характеристик її компонентів.

1.12 Поняття(цільова функція; атрибути системи)

Поняття «системи» [гр. Systeme – ціле] є спільним з найбільш загальних понять, які застосовуються при описі взаємопов'язаних об'єктів і явищ різної природи.

У самому загальному випадку під системою розуміється множина закономірно пов'язаних між собою елементів, що представляє собою певне цілісне утворення і виконує задану цільову функцію.

Біотехнічна система (БТС) являє собою виділені в єдину систему, біологічні і технічні елементи (ланки), пов'язані між собою для виконання заданої цільової функції.

Цільову функцію можна розглядати в якості системоутворюючого фактора, який виділяє елементи в систему з усього різноманіття розглянутих об'єктів і явищ, тобто фактора який умовно розмежовує систему і середовище.

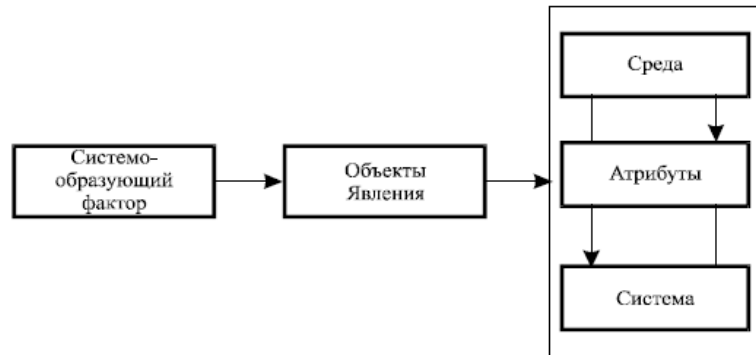


Рисунок 1.1 – Розмежування системи і середовища

Наприклад, для реалізації цільової функції, яка полягає в ранній діагностиці захворювань, утворюється медична діагностична БТС, що об'єднує пацієнта, прилади вимірювання фізіологічних показників організму та засоби діагностики, в якості яких можуть бути розглянуті як лікар, так і технічні засоби.

Кількісну міру взаємодії системи і середовища характеризують атрибути системи. В якості зовнішніх атрибутів системи можуть розглядатися вхідні впливи, параметри середовища, вихідні реакції системи.

Система складається з елементів (ланок), під якими маються на увазі деякі функціонально закінчені одиниці, які характеризуються рядом власних атрибут, що піддаються виміру або оцінці і характеризують взаємодію елементів системи.

1.13 Чим характеризується система?

Система характеризується структурою і поведінкою (функціонуванням).

Під структурою розуміється інваріантна в часі фіксація зв'язків між елементами системи, в якій виявляються співвідношення між її атрибутами.

Під поведінкою розуміється дія системи в часі, що характеризується зміною у часі її атрибут.

1.14 Основна характеристика системи (емерджентність)

Системі притаманні певні характерні властивості, що відрізняють систему від простого набору з'єднаних між собою елементів. Основною характеристикою системи є емерджентність (англ. emergence – виникнення, поява нового), яка визначає ступінь відмінності властивостей системи від властивостей, елементів що входять до неї.

Система має властивості не притаманні окремим елементам системи. При реалізації цільової функції системи проявляються її властивості емерджентності, так як ця функція може бути реалізована тільки на основі взаємозв'язку елементів, які входять в неї.

В якості прикладу можна навести прояв емерджентності медичної діагностичної БТС. Дана система може бути утворена з метою раннього виявлення захворювань, обмеження поширення інфекцій, скорочення витрат на лікування хворих, і т. п. Системі, завдяки взаємозв'язку елементів, притаманна властивість діагностики захворювання та реалізації цільової функції, що не притаманно окремим елементам системи.

Складність системи визначається не тільки збільшенням числа її елементів і зв'язків між ними, а в основному числом елементів, яким притаманний акт прийняття рішення (вибір альтернатив). Зі збільшенням складності системи зростає її емерджентність. Так, медичної діагностичної БТС із збільшенням числа визначених фізіологічних показників організму і розгалуженням алгоритму прийняття рішення про діагнози (збільшується число альтернатив) зростає кількість діагностованих станів (зростає емерджентність системи).

1.15 Стійкість та неідентичність системи

Стійкість характеризується здатністю системи протистояти зовнішнім збурюючим впливам для самозбереження. Для простих технічних систем стійкість визначається міцністю конструкції, енергетичним балансом. У складних системах стійкість зберігається шляхом безперервної заміни елементів. Такі процеси характерні для біологічних систем. Якщо стійкість простих фізичних систем зменшується з ростом складності, стійкість біологічних систем збільшується. Достатньо для ілюстрації вказати на феномен Ферстера, згідно з яким поширеність клітин вищих організмів на Землі перевищує поширеність нижчих істот. Ферстер пояснював це стійкістю складних систем.

Неідентичність характеризується ступенем відмінності систем одного виду. Ступінь відмінності зростає із збільшенням складності систем. Неідентичність популяцій перевищує відміну фізіологічних систем організму людини в популяції, що, зокрема, відкриває можливості для трансплантації органів і тканин одного організму іншому.

Крім матеріальних систем, що складаються з реальних елементів, можуть бути розглянуті знакові системи. Останні, в тій чи іншій мірі відображають перші, є їх моделями.

1.16 Теорія систем (теорія формальних математичних моделей)

Теорія систем є теорія формальних (математичних) моделей реально існуючих систем. У вивченні будь-яких об'єктів можна виділити два аспекти - змістовний, до якого належить сенс і інтерпретація суті явища, значимість, цілі, цінності і т.п., і формальний, пов'язаний з формою (структурою), в якій проявляються співвідношення між атрибутами системи.

Теорія систем досліджує другий, формальний аспект явищ, які розглядаються. Очевидно, що ці формальні співвідношення інваріантні по відношенню до конкретної природи явищ, що розглядаються.

Тому методи теорії систем використовуються для опису систем з абсолютно різномірними елементами. Так, можуть бути розглянуті соціальні, біологічні, технічні системи або системи, що включають взаємопов'язані технічні, біологічні та інші об'єкти.

Теорія систем, в цілому, базується на двох фундаментальних передумовах.

1. Будь-які явища, що реально відбуваються завжди ґрунтуються на деякому образі (моделі).
2. Формальні, інваріантні аспекти цієї моделі можна представити у вигляді математичного співвідношення її атрибут.

1.17 Математична модель реального явища, об'єкта

Математична модель реального явища, об'єкта звичайно шукається у вигляді рівнянь (різницевих, диференціальних і т.д.), що зв'язують атрибути системи. Найбільш часто на практиці зустрічається завдання системи, що характеризується структурою, яка передбачає наявність вхідних і вихідних змінних, параметрів, що описують її внутрішній стан і поведінку.

В цьому випадку система може бути представлена у вигляді:

$$Y = F\{X, V\} \quad (1.1)$$

де: X - вхідні сигнали (впливу); Y - вихідні сигнали (реакції); V - власні параметри; $F\{*\}$ - оператор функціонального перетворення, що визначає поведінку системи.

Стан системи визначається набором значень її власних параметрів або похідних показників. Часто вводиться поняття вектора стану, відображуваного за допомогою фазового простору станів. Зміна величини і положення вектора стану означає перехід

системи з одного стану в інший. Системи, здатні змінювати стан під дією впливів є динамічними.

Під управлінням в системі розуміється сукупність процесів переходу системи з одного стану в інший під дією зовнішніх або внутрішніх факторів.

Опис моделі - перетворення $F\{*\}$ в (1.1) дозволяє описати реакцію системи на вхідні дії, досліджувати стан системи, її керованість і інші властивості. Однак, безумовно, існує різниця між реальною системою і сукупністю рівнянь використовуваних для її завдання. Ці відмінності обумовлені вибором атрибут, необхідних для побудови моделі системи.

1.18 Ціль дослідження системи

Метою дослідження системи є пошук адекватного її опису, що дозволяє передбачити її поведінку, оптимізувати параметри ланок, структуру її елементів.

Пошук опису БТС необхідний для формування вимог до всіх елементів системи з точки зору ефективної реалізації цільової функції системи.

1.19 Ознаки за якими класифікуються БТС

Функції, що виконуються біологічним об'єктом у системі - одна з ознак класифікації БТС. За цією ознакою БТС можна поділити на:

- медичні,
- ергатичних,
- БТС управління цілісним організмом.

У свою чергу, кожна група має свої різновиди, що відрізняються видом цільової функції або областю застосування.

1.20 Медичні БТС

До медичних БТС відносяться системи інструментальної діагностики, лікування захворювань, що використовують фізичні фактори і технічні засоби впливу на організм людини, системи інформаційної підтримки лікувального процесу - клінічні інформаційні системи документування і зберігання даних про пацієнта, системи телемедицини, автоматизовані робочі місця лікаря-фахівця.

1.21 Медичні БТС діагностичного типу

В рамках медичних БТС діагностичного типу формується опис функціональних систем організму людини, що визначають стан організму, засобів реєстрації фізіологічної інформації та діагностики стану. Дослідження БТС необхідно для вироблення вимог до датчиків фізіологічних параметрів, структури технічних засобів, алгоритмів обробки біосигналів і отримання діагностичних показників.

1.22 Медичні БТС терапевтичного типу

Медичні БТС терапевтичного типу описують функціональні системи організму людини, що є об'єктом прикладання лікувальної дії, а також до цих БТС входять : технічні засоби, за допомогою яких відбувається формування впливу; оцінка лікувального ефекту. Дослідження БТС дозволяє сформулювати вимоги до технічних засобів лікувального впливу з точки зору підвищення ефективності лікувального впливу. У таких системах розглядається два контури адаптації: внутрішній - ендогенний, утворений фізіологічними системами організму, і зовнішній, який визначається технічними ланками. Якість адаптації в системі суттєво залежить від можливостей елементів технічної ланки, наприклад, від здатності стеження за станом пацієнта і формування впливу спрямованого на зміну стану. Це визначає високу лікувальну ефективність подібних систем

1.23 Ергатичні БТС

Ергатичні БТС (гр. Ergates - діяч) об'єднують засоби, які вирішують завдання управління складними технічними об'єктами з допомогою людини-оператора. Це авіаційнокосмічні і інші транспортні системи, системи управління енергетичними установками з високим ризиком прийняття рішень, телекомунікаційні, комп'ютерні системи.

Дослідження ергатичних БТС необхідно для формування вимог до людини-оператора, вимог узгодження потоків інформації, які надходять від технічних засобів до живого організму, а також управляючих дій людини-оператора на технічні засоби.

1.24 БТС управління цілісним організмом

БТС управління цілісним організмом об'єднують живі організми і засоби, що служать для формування штучного середовища проживання (космічні, глибоководні дослідження), формування спрямованої поведінки у живих організмів (поведінкові реакції у тварин, віртуальна реальність у людини).

Розглянемо, як приклад, більш докладно структуру медичної діагностичної БТС, що має цільову функцію ранньої діагностики схильності обстежуваних до виникнення серцево-судинних захворювань.

Реалізація цільової функцією БТС здійснюється шляхом діагностики функціональних змін в серцево-судинній системі обстежуваних і розмежуванні обстежуваних за групами:

- «норма» (відсутність діагностуємого стану),
- «відхилення» (ймовірна наявність стану),
- «зміна» (наявність стану).

Патологія серцево-судинної системи є основною причиною захворюваності і смертності в усіх економічно розвинених країнах. Ці захворювання, обумовлюючи високий рівень тимчасової та стійкої непрацездатності, призводять до великих трудових і економічних втрат.

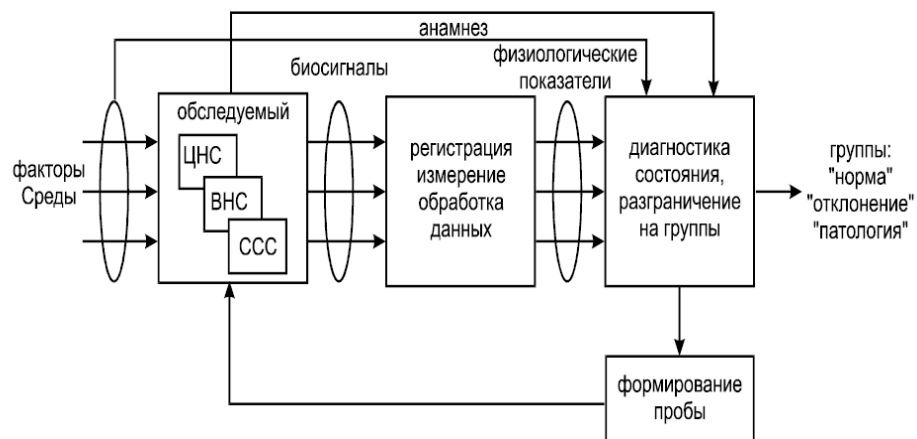


Рисунок 1.2 – Структурно-функціональна схема медичної діагностичної БТС

Одним із шляхів попередження та успішного лікування захворювання є їх раннє виявлення. Діагностичні методи, існуючі для цієї мети, засновані на обробці даних, отриманих в результаті обстеження пацієнта методами функціональної та клінічної

діагностики, що включають дослідження реакції організму (в першу чергу серцево-судинної системи) на провокуючий тестовий вплив (фізіологічну пробу).

Відповідно до цільової функції, яка є системоутворюючим фактором, БТС повинна об'єднувати такі елементи:

- фізіологічні системи організму обстежуваного, відповідальні за формування діагностуємого стану;
- технічні засоби визначення фізіологічних показників, що відображають стан серцево-судинної системи;
- діагностичні засоби, що реалізують вирішальні правила, які визначаються цільовою функцією системи;
- засоби впливу на обстежуваного, необхідні для формування функціональної проби.

Взаємозв'язок елементів БТС визначається цільовою функцією системи. Для розмежування обстежуваних на групи необхідно реалізувати вирішальне правило діагностики на основі отримання даних про пацієнта (анамнез), визначення фізіологічних показників стану серцево-судинної системи шляхом реєстрації, вимірювання та обробки даних на тлі проведення функціональних проб.

Емерджентність розглянутої БТС проявляється в тому, що система має здатність діагностики стану обстежуваного, на відміну від елементів системи, які не володіють кожен окремо даною властивістю.

Розглянемо більш докладно побудову БТС, що використовує в якості фізіологічної проби - пробу з дозованим фізичним навантаженням.

Фізичне навантаження на організм людини спричиняє різноманітну дію на серцево-судинну систему, викликаючи, зокрема, помірне підвищення ЧСС, артеріального тиску, збільшення роботи серця і, відповідно, потреби міокарда в кисні (в порівнянні зі спокоєм у 8 ... 10 разів). У здорової людини це призводить до адекватного розширення коронарних судин (кровотік може посилюватися в 5 ... 7 разів).

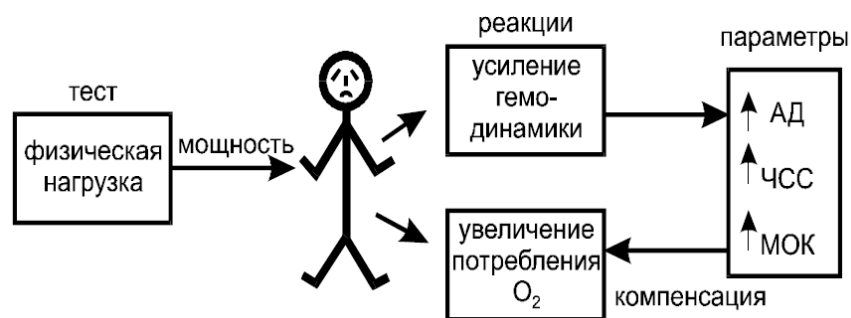


Рисунок 1.3 - Проба з фізичним навантаженням

При появі патологічних змін серцево-судинної системи спостерігається зменшення толерантності організму до фізичного навантаження. При обмеженні коронарного кровообігу, наприклад, внаслідок атеросклеротичних змін коронарних артерій, збільшення потреби міокарда в кисні призводить до гострої коронарної недостатності, що супроводжується приступом стенокардії і можливістю появи в серцевому м'язі ділянок ішемії, які проявляються в змінах ЕКГ.

Проби з дозованим фізичним навантаженням застосовуються з метою встановлення індивідуальної толерантності організму до фізичного навантаження, виявлення прихованої коронарної недостатності, що дає важливу інформацію для діагностики цілого ряду захворювань серцево-судинної системи.

Розглянемо побудову медичної діагностичної системи, заснованої на оцінці толерантності організму обстежуваного до фізичного навантаження.

Діагностичним показником при визначенні толерантності є величина максимально допустимої потужності, що розвивається пацієнтом при виконанні певної м'язової роботи. Для визначення цього показника проводять функціональну пробу з наростаючим фізичним навантаженням, при якому пацієнт виконує м'язову роботу зі зростаючим рівнем потужності. При досягненні максимальної потужності проба припиняється.

Формування дозованого фізичного навантаження може здійснюватися за допомогою велоергометра. У цьому пристрої при фіксованій швидкості обертання обстежуваним педалей (зазвичай, 60 об/хв) потужність навантаження визначається зусиллям електричного гальмування обертання, яке може встановлюватися за допомогою перемикача в необхідних межах. Найчастіше, навантаження збільшують поступово, починаючи з 25 Вт, через кожні 3 ... 5 хв, доходячи до 150 Вт. При тестуванні спортсменів навантаження може доходити до 800 Вт.

Критерієм досягнення максимальної допустимої потужності вважається ряд ознак, що виникають в результаті реакції організму на фізичне навантаження і визначаються за допомогою клінічних та інструментальних методів. В результаті клінічних спостережень встановлено такі ознаки досягнення максимальної допустимої потужності і припинення велоергометричної проби:

- досягнення максимальної величини ЧСС;
- підйом артеріального тиску до значення 230/130 мм рт.ст. ;
- виникнення нападу стенокардії;
- поява задишки, загальної слабкості, запаморочення;
- відмова обстежуваного від проведення проби;
- зміщення сегмента S-T ЕКГ більше 0,1 мВ щодо ізолінії;

- поява частих (1:10) екстрасистол, пароксизмальної тахікардії, миготливої аритмії;
- зміна форми QRS комплексу ЕКГ.

Відповідно до цільової функції, розглянута система повинна включати в себе велоергометр - засіб дозування навантаження, пристрої вимірювання та аналізу фізіологічних параметрів: ЧСС, АТ, відображення та аналізу ЕКГ.

Велоергометрическая проба починається з мінімального значення навантаження. Якщо аналіз даних показує, що ознаки припинення проби відсутні, то навантаження поступово збільшується. При досягненні ознак максимального навантаження проба припиняється, і її величина порівнюється зі шкалою толерантності:

- висока толерантність $P_{\max} > 150$ Вт
- середня $100 \text{ Вт} < P_{\max} < 125 \text{ Вт}$
- низька $P_{\max} < 75 \text{ Вт}$

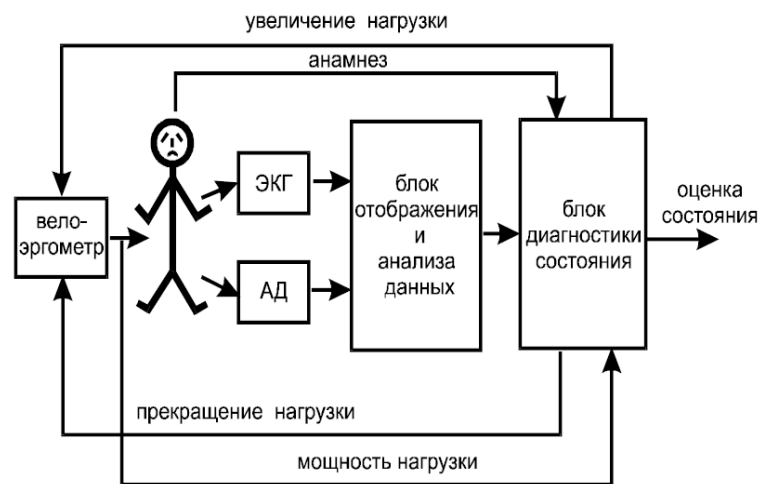


Рисунок 1.4 – Медична діагностична система з використанням тесту з дозованим фізичним навантаженням

Зниження толерантності до фізичного навантаження свідчить про необхідність подальшого обстеження пацієнта з метою встановлення точного діагнозу і проведення лікування.

Подібна діагностична система може використовуватися в режимі скринінгу - «просіюванні», тобто масового обстеження осіб із застосуванням автоматизованих технічних засобів. В результаті формуються принаймні три групи обстежених: з відсутністю діагностується стану (Н «норма»), в даному випадку - висока толерантність, з можливою наявністю стану (В «відхилення») - середня толерантність, з наявністю стану (П- «патологія») - низька толерантність.

Завданням дослідження даної системи будемо вважати відшукування правила роботи діагностичного блоку, що забезпечує виконання цільової функції.

Взаємозв'язок елементів системи дозволяє записати її завдання в термінах «вхід-вихід-стан». Для діагностичного блоку вхідними даними будуть результати обстеження, величина фізичного навантаження, вихідними даними - оцінка толерантності до фізичного навантаження, параметрами стану - величина виміряних фізіологічних параметрів.

При обстеженні практично здорових осіб основним критерієм досягнення $P_{\max}$ стає досягнення максимальної ЧСС, що визначає можливості гемодинаміки обстежуваного.

Для формалізації системи вибираємо такі атрибути

x_1 - стать обстежуваного;

x_2 , років - вік обстежуваного;

v_1 , Вт - величина потужності навантаження;

v_2 , уд / хв - значення ЧСС в ході виконання проби;

y_1 = «НОРМА»;

y_2 = «ВІДХИЛЕННЯ»;

y_3 = «ПАТОЛОГІЯ».

Встановимо зв'язок між атрибутами системи. Оцінка толерантності формується на основі шкали:

$$y = \begin{cases} y_1, v_{1MAX} \geq 150 \text{Вт}; \\ y_2, 100 \text{Вт} \leq v_{1MAX} \leq 125 \text{Вт}; \\ y_3, v_{1MAX} < 75 \text{Вт}; \end{cases} \quad (1.2)$$

$$v_{1\max} = v_1, \text{ при } v_2 = v_{2\max}, v_{2\max} = f(x_1, x_2).$$

Величина максимальної ЧСС $v_{2\max}$ визначається на підставі даних, отриманих методом навчальної вибірки при обстеженні здорових осіб (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Експериментальні дані дослідження

	x_2 , лет	25	35	45	55	65
$v_{2\max}$, уд/мин	Муж.	195	187	178	170	162
	Жен.	198	189	179	171	163

Отримані співвідношення описують систему так як розглядаються вибрані атрибути. Однак, це опис незручний для побудови алгоритму роботи діагностичного пристрою, хоча б тому, що містить дискретний ряд x_2 , що не відображає всіх можливих вікових груп обстежуваних. Для більш ефективного опису системи можна знайти вид

функціонального зв'язку - атрибут, наприклад, за допомогою методу лінійної регресії. Дійсно, дані таблиці 1.1 можна представити в наступному вигляді:

$$v_{2MAX} = \begin{cases} 216 - 0,83x_2; & x_1 = M \\ 216 - 0,88x_2; & x_1 = Ж \end{cases}$$

Таке завдання системи дозволяє при будь-якому значенні X отримати відповідне значення атрибута V .

Отримана модель є основою для побудови діагностичного пристрою. Вона пов'язує толерантність до фізичного навантаження з вхідними даними (стать, вік) і величиною фізичного навантаження формується за допомогою велоергометра.

Розглянутий приклад побудови системи відображає характерні риси методів теорії систем.

Шлях побудови системи лежить від формулювання завдання дослідження, вибору атрибутів, які підлягають спостереженню, до відшукування функціонального зв'язку між атрибутами, що відображають функціонування системи, тобто до з'єднання отриманих даних воедино для формалізації системи. Система повинна володіти ефективною (конструктивною) формою завдання, що забезпечує рішення задачі, поставленої при побудові системи.

Можна помітити, що, в силу обмеженості вибору атрибутів системи, за рамками дослідження можуть залишитися різні фактори, які можна віднести до вхідних змінних і власних параметрів системи.

Так, в розглянутому прикладі легко виявити обмеженість отриманої моделі. У системі не враховується вплив на результат діагностики фізіологічних показників обстежуваного: маси тіла, зростання, точності вимірювання частоти серцевих скорочень. Тому після формалізації системи проводять дослідження її властивостей і інтерпретацію результатів, які можуть привести до уточнення завдання системи. Таким чином, процес побудови системи є рекурсивним; він призводить до поступового ускладнення моделі і розширенню властивостей, які вона описує.

Найбільшу трудність при системному аналізі представляє дослідження біологічних об'єктів в силу їх складності і досить мізерної інформації про їх структуру та механізми поведінки. Тому важливим завданням дослідження живих систем є передбачення реакції системи на певний вплив. Рішення такого завдання призводить до проблеми ідентифікації функціонального перетворення $F\{*\}$ термінального завдання системи.

Розгляд взаємопов'язаних біологічних і технічних об'єктів і явищ призводить до біотехнічних систем (БТС). Виділення біологічних і технічних ланок в систему має певну спрямованість, що задається цільовою функцією системи. Під БТС можна розуміти будь-формальне завдання взаємодіючих біологічних і технічних елементів, об'єднаних в єдину функціональну систему цілеспрямованої дії.

Грунтуючись на загальній теорії систем, теорія БТС досліджує закономірності взаємодії технічних засобів і живих організмів на основі їх однакового опису.

Основними завданнями дослідження БТС є оптимізація технічних і біологічних ланок, спрямована на найкраще виконання цільової функції системи, формування вимог до проектування апаратури, методів обробки сигналів, алгоритмів управління станом біологічних об'єктів.

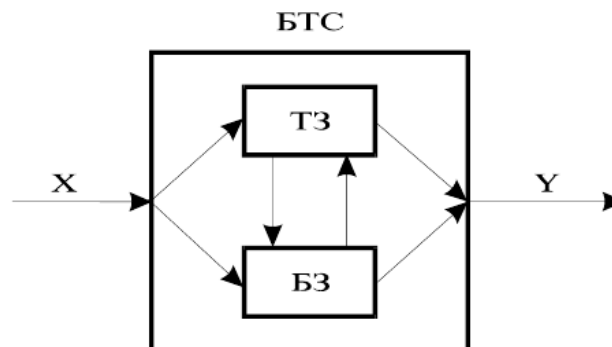


Рисунок 1.5 – Біотехнічна система: ТЗ - технічна ланка,
БЗ - біологічна ланка

1.25 Принципи адекватності та єдності при формуванні БТС

Виходячи з фундаментальних передумов теорії систем, при формуванні БТС використовуються два принципи:

1. Принцип адекватності взаємодії, реалізація якого вимагає узгодження основних параметрів і характеристик біологічних і технічних ланок БТС.
2. Принцип єдності інформаційного середовища, що вимагає узгодження інформаційних потоків, що циркулюють між технічними і біологічними ланками в аферентних і еферентних напрямках.

Згідно з цими принципами, наприклад, лікувальний вплив, що формується технічними засобами повинен бути по своєму фізико-хімічному складу властивий живому організму, а значення параметрів впливу повинні знаходитися в діапазоні прийнятності для біологічних тканин.

Так, електростимуляція, з успіхом використовується в медицині, заснована на лікувальній дії електричного струму, що є адекватним подразником живих тканин в силу електричної природи процесів генерації і проведення збудження в нервових тканинах. Для м'язової електростимуляції частоту проходження стимулів вибирають в області природної імпульсації відповідних м'язів.

Прикладом реалізації принципу адекватності може служити побудова біоуправляємих електрокардіостимуляторів, які імплантуються. В яких параметри впливу визначаються станом пацієнта (наприклад, частота слідування стимулів залежить від рівня фізичного навантаження). Величина фізичного навантаження, що керує стимулами може визначатися в діагностичному пристрої кардіостимулятора за результатами оцінки температури крові, частоти дихання, інтенсивності механічних струсів тіла.

Реалізація принципу єдності інформаційного середовища вимагає єдиного підходу до методів реєстрації медико-біологічної інформації, стандартів представлення результатів обстежень (ЕКГ, рентгенівських знімків та ін.).

Для діагностичних БТС єдність інформаційного середовища означає виділення для відображення найбільш інформативних діагностичних показників по відношенню до оцінюваного стана пацієнта. Так, способи відображення інформації (шкали, цифрові табло, індикатори) вибираються відповідно до особливостей сприйняття людини. Для ергатичних БТС вибір сенсорних модальностей сприйняття даних здійснюється відповідно до пропускної спроможності зорового, слухового, тактильного аналізатора людини.

Коректне дотримання принципів адекватності взаємодії і єдності інформаційного середовища дозволяє об'єднати біологічні та технічні ланки в БТС. Ці ланки мають високу ефективністю реалізації цільової функції.

1.26 Основні функціональні характеристики біотехнічних систем

Якість виконання цільової функції системи може бути оцінений за допомогою дослідження функціональних характеристик. Показники функціонування, визначаються на основі аналізу цих характеристик, дають кількісну міру для оцінки властивостей БТС і використовуються при порівнянні різних варіантів побудови системи і способу її опису з точки зору критеріїв найкращого досягнення мети. Важливими функціональними характеристиками БТС є: ефективність, надійність, якість управління.

1.27 Ефективність БТС

Ефективність є найбільш поширеною характеристикою, яка б показала якість виконання цільової функції БТС в заданих умовах. Показник ефективності БТС характеризує ступінь пристосованості елементів системи до виконання поставлених завдань. Формування показника засноване на оцінці співвідношення параметрів результату і величини витрачених на їх досягнення засобів.

$$\text{Ефективність} = \frac{\text{параметри результату}}{\text{засоби досягнення}} \quad (1.3)$$

Для пояснення способу визначення показника ефективності звернемося до двох прикладів.

Приклад 1

Розглянемо задачу визначення ефективності ергатичної БТС, яка включає людину-оператора. Людина виконує функції контролю стану і управління складним технічним об'єктом. Оператор отримує інформацію про поточний стан об'єкта за допомогою аудіовізуальних засобів відображення інформації, сприймає її, переробляє і виконує відповідно до одержаного завдання необхідні дії з управління об'єктом. Наприклад, система включає апаратно-програмний комплекс, висуваючи малорозмірне зображення об'єкта на екрані дисплея. Зображення має характерні властивості (яскравість, структуру), які оператору необхідно виявити і ідентифікувати на тлі перешкод, причому завдання оператора полягає в фіксації параметрів зображення, наприклад, моменту появи об'єкта на екрані, за допомогою органу ручного управління - маніпулятора.

Елементи, які беруть участь в даному процесі, розглядаються в рамках БТС ергатичній типу. Біологічна ланка БТС включає сенсорну (зорову) систему організму, ЦНС, ефекторні системи дії, що відповідають за приведення в дію маніпулятора, технічна ланка представляє собою апаратно-програмний комплекс (АПК) з комп'ютерним терміналом і блоком маніпуляції.

Ефективність БТС визначається цілеспрямованою діяльністю людини-оператора. Для оцінки ефективності системи виберемо відповідно до (1.3) параметри результату і показники витрат на його досягнення.

Параметри результату можна визначити в тестовому режимі роботи АПК. В цьому режимі оператору пред'являється тест, що повністю імітує його роботу в реальних умовах. Тест складається з ряду завдань, параметри виявлення об'єкта в яких, відомі. Наприклад,

може бути відома кількість об'єктів, які пред'являються оператору в одному завданні. Тоді за кількістю зафіксованих оператором об'єктів можна знайти величину оцінки ймовірності виявлення оператором об'єктів в одному завданні, яка може бути використана в якості об'єктивної оцінки параметра результату.

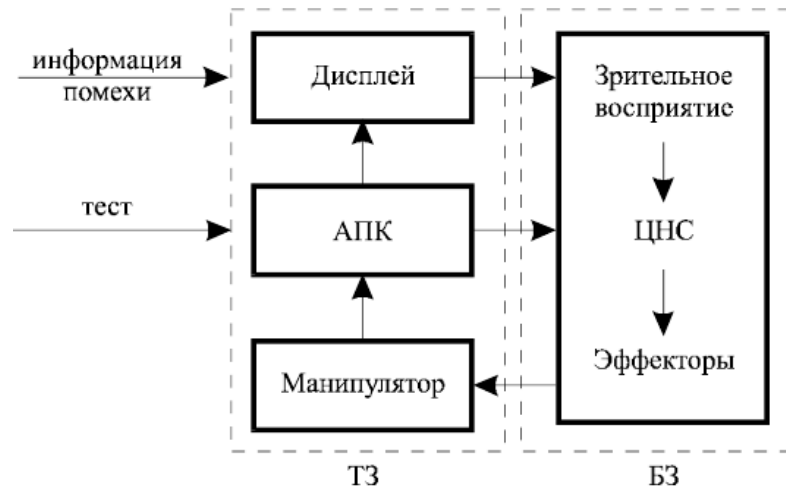


Рисунок 1.7 – Взаємодія оператора з апаратно-програмним комплексом при виявленні об'єктів

Другу складову ефективності - величину витрат організму на досягнення результату, можна оцінити за допомогою визначення «фізіологічної ціни» інформаційного навантаження оператора. Навантаження на оператора, що виникає при виконанні тесту, викликає психоемоційну напругу, що виявляється в вегетативних реакціях організму. Таким чином, витрати організму можна охарактеризувати шляхом реєстрації фізіологічних параметрів організму і оцінки показників, що відображають зрушення регуляції в вегетативній нервовій системі у відповідь на тест. Найчастіше, для цієї мети в психофізіологічних дослідженнях використовується реєстрація параметрів серцевого ритму, величини артеріального тиску крові, частоти дихання, інтенсивності потовиділення, температури шкіри.

Таким чином, показник ефективності БТС набуває вигляду:

$$E = \frac{\gamma P}{Q} \quad (1.4)$$

де: $\gamma = 1 \dots 10$ - коефіцієнт складності тесту; P - оцінка ймовірності виявлення об'єктів; Q - показника витрат організму у відповідь на тест.

При цьому, оцінка ймовірності виявлення об'єктів визначається за

$$P = \frac{N_3}{N_n} \quad (1.5)$$

формулою:

де: N_3 - кількість об'єктів зафіксованих оператором в завданні, N_n - кількість об'єктів пред'являються в завданні.

1.28 Надійність БТС

Надійність в БТС неможливо оцінити, так як це робиться в техніці. Це пов'язано з тим, що біологічні об'єкти є складними системами, що характеризуються ієрархічною розгалуженою структурою, надмірністю, підтримувану безперервним відтворенням елементів. Що стосується технічних ланок БТС, то тут використовуються традиційні підходи.

У нормальних умовах функціонування можна говорити лише про зниження ефективності системи при відмові її елементів. Як показник, що характеризує надійність БТС, може бути обрана величина відносного зниження ефективності:

$$\delta E_{\text{НАД}} = \frac{(E_H - E_B)}{E_H} \quad (1.7)$$

де: E_H - показник ефективності системи, коли всі елементи функціонують нормально, E_B - показник ефективності системи при відмові елементів із заданою інтенсивністю.

1.29 Якість управління в БТС

Якість управління в БТС характеризує процес переходу системи з одного стану в інший під дією зовнішніх або внутрішніх факторів (рисунок 1.8).

Зовнішні або внутрішні чинники представляються за допомогою вектора керуючого впливу, який впливає на вихідні реакції системи. Показник якості управління можна визначити шляхом порівняння ефективності системи для декількох варіантів управління.

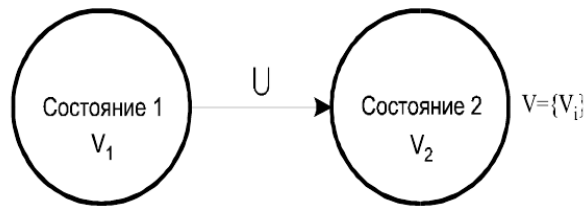


Рисунок 1.8 – Управління в БТС: U - вектор керуючого впливу

Так, якщо $E_б$ - ефективність БТС при базовому варіанті управління, а $E_п$ - ефективність БТС для порівнюваного варіанту, то величина відносної зміни ефективності може бути оцінкою якості управління варіанту порівняння:

$$\delta E_{упр} = \frac{(E_б - E_п)}{E_б} \quad (1.8)$$

Якість управління може бути оцінений при порівнянні терапевтичних БТС, що використовують різні методи формування лікувальної дії.

Наприклад, в анестезіологічній практиці для цілей післяопераційного знеболювання використовується введення лікарських препаратів-анальгетиків. Альтернативним варіантом придушення больових відчуттів є застосування черезшкірної електростимуляції. У першому випадку, система, включає шприцевий насос-дозатор, запрограмований для безперервного введення необхідної дози лікарського препарату у кров'яне русло (базовий варіант для порівняння якості управління). У другому випадку, в якості технічної ланки використовується протибольовий електростимулятор, який впливає на пацієнта дією струма через електроди розташовані на шкірі.

Ефективність системи знеболювання можна оцінити по відношенню вираженості больових відчуттів у пацієнтів, яка визначена за бальною шкалою в відповідні моменти лікування, до бальної оцінки побічних ефектів застосованого способу знеболювання.

Якщо бальна оцінка зниження больових відчуттів в обох випадках практично збігається, то побічні ефекти менш виражені при використанні електроанальгезії. Таким чином, ефективність знеболювання при використанні чрезшкірної електростимуляції буде вищою, ніж при застосуванні анальгетиків, що свідчить про більш високу якість управління станом пацієнта в даній системі.

1.30 Біотехнічні проблеми при розробці та дослідженнях нової техніки

У багатьох областях діяльності людини при розробці та дослідженні нової техніки виникають біотехнічні проблеми. У медицині - при створенні технічних засобів для

діагностики і лікування захворювань, на транспорті - при розробці засобів управління рухом швидкісних об'єктів, в енергетиці - при постійному контролі й управлінні засобами розподілу ресурсів і т. п.

Рішення біотехнічної проблеми вимагає формування БТС. Структура БТС показує зв'язок і взаємодію технічних засобів і фізіологічних систем живого організму. Найбільшу складність при побудові БТС викликає спільний опис біологічних і технічних ланок системи. Це пов'язано, в першу чергу, з різними підходами до моделювання, сформованими в біології і техніці.

Технічні об'єкти створюються, як правило, на основі відомих процесів і явищ, що мають формалізований опис. Механізм дії біологічних об'єктів часто не ясний і при описі нерідко доводиться обмежуватися феноменологічними моделями. Для опису БТС в цілому при розгляді біологічних ланок необхідний "техногенний" підхід, що передбачає виділення таких атрибутів, які б відображали виконання цільової функції системи і були б прийнятними для використання в описі технічних ланок.

Виконання цих умов вимагає певної послідовності у формуванні та дослідженні БТС.

1.31 Етапи в формуванні та дослідженні БТС

Перший етап формування БТС - біологічний.

Другий етап дослідження БТС - етап узгодження.

Третій етап дослідження БТС - технічний.

1.32 Перший етап формування БТС (біологічний)

Перший етап формування БТС - біологічний. Відповідно до біотехнічної проблеми формується цільова функція системи, визначаються можливі біологічні та технічні ланки БТС. Складається структурно-функціональна схема БТС. Проводиться вивчення фізіологічних процесів організму в умовах його взаємодії з технічними ланками системи. В результаті, визначається завдання біологічної ланки БТС і формується її модель, в якій фігурують атрибути завдання (вхідні, вихідні змінні, показники стану, параметри управління і т.п.).

1.33 Другий етап дослідження БТС (узгодження)

Другий етап дослідження БТС - етап узгодження. На цьому етапі формується модель технічної ланки БТС. Складається модель БТС в цілому. Досліджуються процеси взаємодії ланок на основі виконання принципів адекватності та єдності інформаційного середовища БТС. Відбувається ітераційне відпрацювання моделі з метою оптимізації параметрів за обраними критеріями ефективності.

Ведеться пошук найбільш інформативних показників, що вимагають мінімуму афферентної інформації від живого організму. На другому етапі проводиться оптимізація вирішальних правил і алгоритмів функціонування, розробляються вимоги до технічних засобів і програмного забезпечення.

1.34 Третій етап дослідження БТС (технічний)

Третій етап дослідження БТС - технічний. На даному етапі розробляються макети і експериментальні зразки технічних засобів, проводяться напівнатурні і натурні випробування. В результаті визначаються технічні характеристики елементів системи, необхідні для розробки дослідних зразків апаратних засобів, складаються медико-технічні вимоги на дослідно-конструкторські роботи (ДКР).

1.35 Метод поетапного моделювання БТС

Далі проводиться проектування виробу в рамках ДКР. Постановка виробів на виробництво проводиться відповідно до ГОСТ, який регламентує вимоги до технічної документації, дослідних зразків, випробуваннями, сертифікації і т.д.

Наведена методологія рішення біотехнічних проблем запропонована професором Ахутиним В.М. і носить назву методу поетапного моделювання БТС.

Цей метод передбачає перехід від первісного формулювання біотехнічної проблеми до БТС із заданою цільовою функцією, через накопичення експериментальних даних про біооб'єкти до моделі БТС в цілому, і на завершальному етапі до медико-технічних вимог та дослідних зразків апаратури.

1.36 Особливості живого організму, які проявляються при розгляді його як ланки БТС

Найбільш відповідальним етапом вивчення БТС є біологічний етап, який визначає біологічну ланку БТС. Відзначимо особливості живого організму, які проявляються при розгляді його як ланки БТС.

Живі організми, за визначенням фон Бергаланфі, є відкритими системами, в яких здійснюється керований обмін інформацією і речовиною з навколишнім середовищем. При розгляді живого організму, як ланки БТС можна виділити ряд його функцій, що забезпечують взаємодію з навколишнім середовищем:

- кібернетичні функції, пов'язані з інформаційною взаємодією з середовищем, вибором і реалізацією адекватних форм поведінки;
- метаболічні функції, пов'язані з енергетичним і субстратним забезпеченням виникаючих форм поведінки.

1.37 Рівні взаємодії технічних та біологічних ланок БТС

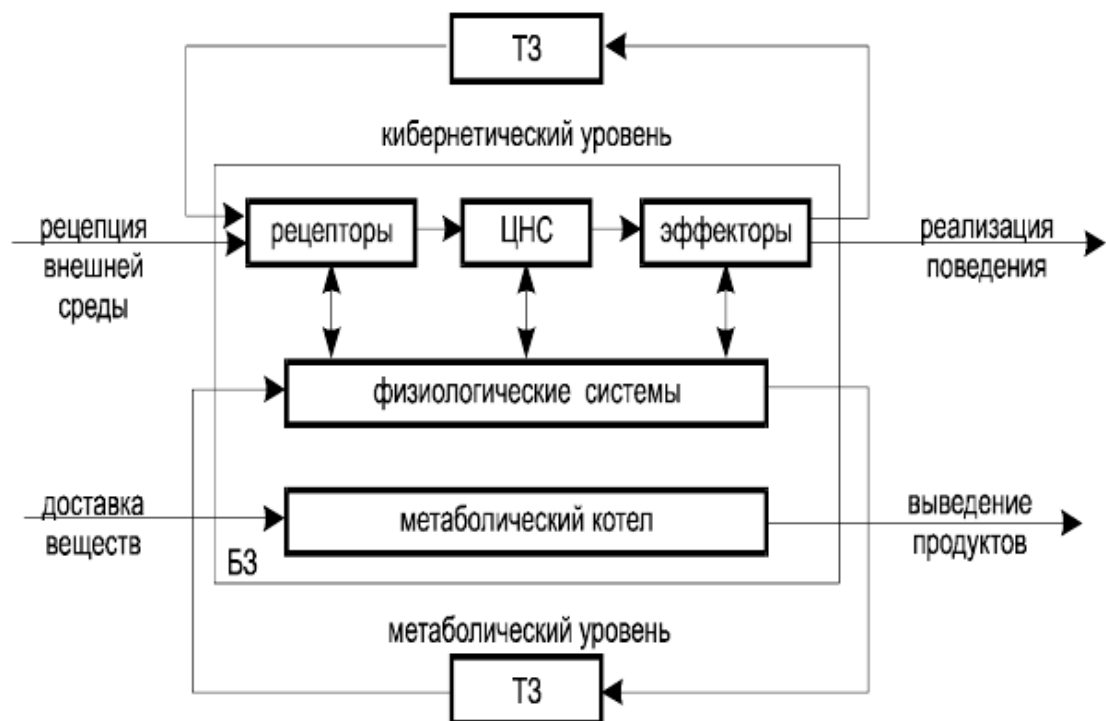


Рисунок 1.9 – Рівні взаємодії технічних і біологічних ланок БТС

1.38 Кібернетичні функції організму. Ефекторні системи

Кібернетичні функції організму включають в себе рецепцію зовнішнього і внутрішнього середовища (сенсорні органи, рецептори внутрішніх органів), переробку інформації і діяльність мозку (прийняття рішень, управління активністю), реалізацію форм поведінки за допомогою ефекторних систем (рух, мова), регуляцію внутрішнього середовища організму (функціональні системи).

1.39 Метаболічні функції організму

Метаболічні функції організму включають доставку з середовища субстратів, живильних речовин, окислювача (вуглеводи, білки за допомогою шлунково-кишкового тракту; кисень за допомогою дихальної системи і кровообігу), отримання енергії, синтез і перетворення речовин (біохімічні процеси), виведення з організму продуктів життєдіяльності (води, вуглекислого газу).

1.40 Характер взаємодії технічних та біологічних ланок, які визначають структуру БТС

Характер взаємодії технічних і біологічних ланок визначає структуру БТС. Для ергатичних БТС, де біологічна ланка представлена людиною-оператором, яка виконує різні функції в замкнутому контурі управління технічною системою, характерним є кібернетичний рівень взаємодії.

У цьому випадку, ефективність БТС буде оцінюватися показниками технічної ланки, наприклад, точністю руху літака по заданій траєкторії, швидкістю руху прокатного стану і т.д.

У разі побудови медичних БТС біологічні ланки системи представлені фізіологічними системами організму.

Наприклад, в разі терапевтичних БТС організм виступає в ролі керованого об'єкта. Ефективність БТС, в цьому випадку, визначається ступенем близькості поточного стану організму або показників ефективності функціонування фізіологічних систем до норми. Тут, в основному, проявляється метаболічний характер взаємодії біологічних і технічних ланок, однак, кібернетична взаємодія може зберігатися.

Наприклад, створення протезів сенсорних органів і ефекторних систем, приладів біологічного зворотного зв'язку для навчання управлінням вегетативними функціями, протезів кінцівок вимагає аналізу БТС з кібернетичним рівнем взаємодії ланок.

Метаболічний рівень взаємодії в БТС в найбільшій мірі проявляється при створенні штучних органів (штучне серце, нирки), а також систем життєзабезпечення при роботі людини в екстремальних умовах середовища (космічні, глибоководні дослідження).

1.41 Особливості формування біотехнічних систем різного призначення

Медичні біотехнічні системи. Завдання формування медичних біотехнічних систем виникає, перш за все, при створенні нової медичної техніки. В основі розробки медичної техніки лежить формування медико-технічних вимог, які містять фізіологічно обґрунтовані вимоги до побудови апаратури, що забезпечує її ефективне функціонування.

Для терапевтичної апаратури ці вимоги визначають вибір адекватного виду лікувального впливу, завдання умов передачі впливу від технічних засобів до біологічних тканин, а також вибір форми, інтенсивності та інших параметрів впливу, які забезпечують високу лікувальну ефективність.

При розробці діагностичної апаратури медико-технічні вимоги стосуються вибору найбільш інформативних фізіологічних параметрів організму і діагностичних показників, що реалізуються за допомогою доступних засобів вимірювальної техніки та відображають патологічні зміни в організмі або схильність до них.

Подібні питання, які потребують спільного вивчення технічних засобів і фізіологічних систем організму, вирішуються в рамках медичних БТС.

Найбільш важливим етапом побудови медичних БТС є адекватне умовам даної задачі описання процесів функціонування фізіологічної системи, яка входить до складу БТС в якості біологічної ланки.

1.42 Сучасні методи вивчення біологічних об'єктів, як ланок БТС

У сучасних методах вивчення біологічних об'єктів, як ланок БТС, можна виділити три основні напрями.

1. Ієрархічний підхід, відповідно до якого процеси відбуваються в живих організмах досліджують в міру ускладнення їх будови і організації. За визначенням

академіка В.В. Парина дослідження просувається від клітини до тканини, від тканини до органу, від органу до фізіологічної системи і від системи до цілісного організму.

2. Вивчення об'єктів і явищ з позицій загальної теорії функціональних систем (П. К. Анохіна), що дозволяє зв'язати в єдине ціле структури живого організму відповідальні за аферентний синтез, прийняття рішення, ефекторні реакції і корисний результат пристосування.

3. Кібернетичний системний підхід, який вивчає біологічні об'єкти методами сучасної теорії управління з використанням ідентифікації біологічних об'єктів в класі певних математичних моделей і обчислювальних алгоритмів. Ці напрямки в дослідженні біологічних об'єктів розвивалися паралельно з удосконаленням уявлень про будову живого організму і накопичення природних і технічних знань. Кібернетичний системний підхід у вивченні живого виник на основі традиційних якісних "біологічних" методів дослідження. Цей підхід зручний для використання при побудові БТС, так як залучення сучасного математичного апарату призводить до моделей, найбільш близьких до опису процесів в технічних ланках.

1.43 Порівняльні еволюційні дослідження, які дозволяють виявити певну етапність в розвитку живих організмів

У розгляді біологічних об'єктів з точки зору ієрархічного підходу важливий еволюційний аспект, що дозволяє простежити за зміною структури і функції окремих фізіологічних систем від "простих" до вищих тварин і людини, тим більше що в біологічному світі для дослідження представлені організми будь-якої складності. Порівняльні еволюційні дослідження дозволяють виявити певну етапність у розвитку живих організмів:

1. Формування внутрішнього середовища організмів; при переході від "простих" до більш складних форм життя, клітини, об'єднані в організмі, які ізолюють себе від зовнішніх впливів.

2. Формування фізіологічних систем (кровообігу, газообміну і т.п.), що включають спеціалізований рецепторний апарат (хемо, баро, терморецептори і т.п.), поява спеціалізованих систем регулювання параметрів (t° , рН, тиску тощо.).

3. Формування нервової системи. Відокремлення сприйняття, обробки інформації та рухової діяльності.

4. Виникнення більш гнучких алгоритмів і більш ефективних способів управління внутрішнім середовищем організму. Утворення кількох рівнів управління, розподіл механізмів на центральні і периферичні.

5. Ускладнення нервової системи, високий ступінь спеціалізації і розвитку сенсорних систем, еволюція мозку у ссавців. Формування у тварин поведінкових реакцій з накопиченням індивідуального досвіду. Формування у людини свідомості - здатності до самовдосконалення, навчання, засвоєння знань, отримання нових знань. В процесі еволюції виявляється однотипність організації, структурна подібність, взаємозамінність елементів в окремих підсистемах, наявність багаторазового запасу елементів. Ці фактори дозволяють, зокрема, проводити вивчення властивостей живого організму на більш низьких рівнях біологічної ієрархії і поширювати отримані дані на організм людини.

1.44 Методи біоіндикації. Приклади біологічних посередників

Так, в екологічному моніторингу використовуються методи біоіндикації, які дозволяють виконувати кількісну оцінку стану системи "організм - навколишнє середовище". Як вимірювальний об'єкт використовується біологічний "посередник", у якого ведеться реєстрація параметрів життєдіяльності. Наприклад, для цілей екологічного моніторингу водойм в якості біологічного "посередника" використовуються інфузорії, подібні клітинам миготливого епітелію людини. Інфузорії поміщаються в середу з тестованої рідиною, де реєструється їх рухова активність. За зниженням активності інфузорій можна судити про ступінь інтегральної шкідливості досліджуваної рідини. Для тих же цілей використовуються неелектричні риби, у яких безконтактно ведеться реєстрація серцевого ритму. Нільський слоник застосовується для біоіндикації геофізичних аномалій, пов'язаних з наближенням землетрусів. Частота електричних розрядів, що реєструється у цих рибок істотно зростає за декілька діб до землетрусів.

При токсикологічних випробуваннях медичного хірургічного інструменту в якості біологічного посередника використовується проба клітин ссавців, які мають рухливість, ці клітини поєднуються з зразками, що тестуються; зниження рухової активності клітин вказує на токсичність матеріалу інструменту. Взаємозамінність біологічних тканин використовується в трансплантології, зокрема, при аутоімплантації в судинній хірургії. Використання ієрархічного підходу в дослідженні біологічних об'єктів на біологічному етапі синтезу БТС дозволяє краще зрозуміти функціонування складних систем при їх вивченні в розвитку - від об'єднання клітин до формування фізіологічних систем. Наприклад, формування БТС електрокардіостимуляції починається з вивчення

електричного збудження в клітинах автономного вузла від поширення збудження по серцю до процесу скорочення міокарда і далі до гемодинамічної функції серця як цілого органу. Для розуміння природи аритмій необхідно вивчення системи регуляції ритму серця, що охоплює вегетативні та центральні ланки управління.

1.45 Структура біотехнічних систем ергатичного типу

Потреба у вивченні БТС ергатичний типу (рисунок 1.10) виникла в зв'язку з необхідністю підвищення ефективності діяльності оператора в людино-машинних системах з високим ступенем відповідальності за прийняття рішення (швидкісні транспортні системи, енергетичні установки, системи життєзабезпечення і т.п.).



Рисунок 1.10 – Структура БТС ергатичного типу

Незважаючи на високий ступінь автоматизації подібних систем, на людину-оператора покладаються важливі функції управління системою, особливо у випадках виникнення позаштатних і аварійних ситуацій. Тут проявляються суб'єктивні чинники притаманні людському організму: - можливість паралельного аналізу подій; - інтегрування розрізнених сигналів в єдине ціле; - евристичні шляхи прийняття складних рішень. Використання біотехнічного системного підходу дозволяє будувати адекватні моделі людино-машинних систем, що дозволяють досліджувати процеси управління, в тому числі моделювати аварійні ситуації для виборі стратегій поведінки і навчання операторів. Людина-оператор розглядається в ергатичних БТС як ланка системи, що виконує функції управління технічними об'єктами (ланками) при кібернетичному рівні взаємодії ланок. Дана взаємодія стосується процесів і явищ, які належать до різних рівнів біологічної ієрархії.

1.46 Моделювання ергатичних БТС

Тому моделювання ергатичних БТС необхідно проводити на декількох рівнях:

- тканинному, (для опису енергетичних витрат у процесі операторської діяльності);
- органному, (для опису функціонування сенсорних і ефекторних систем);
- організмному, (для опису поведінки оператора в процесі управління);
- популяційному (для опису процесів проведення відбору операторів, формування мотивації до професійної діяльності).

1.47 Важливий момент моделювання ергатичних БТС – опис взаємодії організму з середовищем (формування акту поведінки)

Найбільш важливим моментом для моделювання ергатичних БТС є опис взаємодії організму із середовищем, що включає формування акту поведінки. Центральна архітектура акту поведінки (по П. К. Анохину) (рисунок 1.11) включає в себе блоки афферентної синтезу і акцептора результату дії. Останній блок пов'язаний з блоком дії еферентних шляхів збудження і зворотною афферентацією з параметрами результату дії.



Рисунок 1.11– Формування акту поведінки (по П. К. Анохину)

1.48 Афферентний синтез

Афферентний синтез (по П. К. Анохину) об'єднує такі компоненти:

- біологічну мотивацію, що виникає на основі внутрішньої потреби організму;
- механізми пам'яті, обумовлені генетичним і індивідуальним досвідом;
- обстановочну афферентацію;

- пускову аферентацію.

Інтегрування компонент аферентного синтезу відбувається за принципом домінанти і завершується актом прийняття рішення. Акцептор (лат. Acceptor - приймаючий) результату дії є основною ланкою у формуванні акту поведінки, пов'язаний із задоволенням домінуючою потреби організму. Цей компонент системної організації акту поведінки визначає виникнення вищих мотивацій тварин і людини, обумовлених не тільки біологічними потребами, а й впливом оточуючих і соціальних факторів. У складі акцептору результату дії є вроджені та набуті механізми. Генетично запрограмованими є всі основні біологічні мотивації. Мотивації, що виникають в процесі індивідуального розвитку, "збагачують" акцептор результату дії, який стає фізіологічним апаратом формування мети акту поведінки. Важливу роль при вивченні аферентного синтезу відіграють дослідження сенсорних систем, тобто тих каналів, по яких йде обмін інформацією між організмом, технічними засобами і зовнішнім середовищем. Для людини-оператора це, в першу чергу, зорова і слухова системи, що мають певні особливості функціонування, що мають, зокрема, властиві всім живим організмам, властивість адаптації.

Модель аферентного синтезу можна розглядати як один з основних елементів моделі біологічної ланки БТС ергатичній типу, так як аферентний синтез характеризує найважливішу властивість людини-оператора - його здатність до навчання. Саме тому більшість методик відбору операторів, визначення працездатності, в тій чи іншій мірі пов'язані з вивченням характеристики навчання.

1.49 Ефективність роботи оператора в БТС

Важливим етапом дослідження ефективності роботи оператора в БТС ергатичного типу є узгодження потоків інформації, що надходять до оператора від технічних ланок і «пропускної» здатності його сенсорних систем, а також обсягу керуючих впливів, необхідних для управління технічним об'єктом, і можливостей фізіологічних ефекторних систем. У процесі даного узгодження виконуваного в режимі тестування оператора виробляються вимоги до способів подання інформації (використання різних сенсорних модальностей, стиснення даних, інтегральних показників і т.п.), а так само до способів реалізації керуючих впливів (мова, рух і т.п.). В результаті дослідження сенсорних і ефекторних систем, їх взаємодії з технічними елементами, вивченні психологічних особливостей діяльності оператора, його здатності до навчання визначається модель

біологічної ланки БТС - психофізіологічний портрет оператора для виконання заданої цільової функції.

Можливість моделювання умов діяльності оператора дозволяє вести вивчення ефективності його роботи поза реальною системою. Для цієї мети створюється тренажерно-моделюючий апаратно-програмний комплекс, що імітує робочу обстановку і здійснює формування тест-завдання і умов середовища, аналіз і обробку результатів діяльності оператора.

Найбільш важливим моментом при побудові комплексу є розробка об'єктивних методів оцінки «вартості» результату, необхідних для визначення показника ефективності.

Кількісна оцінка ефективності дозволяє проводити відбір операторів відповідно до їх індивідуальних характеристик, вивчати ефективність інформаційного і ефекторного узгодження елементів системи.

1.50 Біотехнічний системний підхід в рішенні задачі підвищення ефективності людино-машинних систем

Для ілюстрації біотехнічного системного підходу у вирішенні завдання підвищення ефективності людино-машинних систем розглянемо підвищення ефективності управління рухом транспортних засобів (рисунк 1.12). Обмежимося аналізом випадку керування рухом, в якому оператор управляє параметрами руху об'єкта в залежності від висунутого параметра руху. Завдання оператора полягає в зміні параметрів руху об'єкта, від поточного значення параметра до значення, обумовленого цілевказівником, шляхом переміщення органу управління. Наприклад, в полі зору водія автомобіля, що рухається з певною швидкістю, потрапляє дорожній знак, який регламентує швидкість руху і водій, шляхом переміщення відповідної педалі управління, повинен привести швидкість руху відповідно до пропонованої регламентацією.

Рішення поставленого завдання може бути розглянуто в рамках ергатичній БТС, що об'єднує технічну ланку - керований транспортний засіб і біологічну ланку - оператора.

Дослідження даної системи передбачає встановлення залежності показників ефективності системи від зміни параметрів і характеристик основних її ланок і на цій основі формування вимог щодо підвищення ефективності управління рухом.

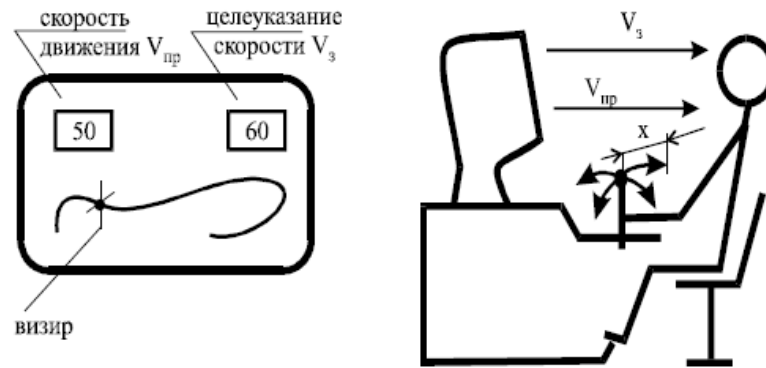


Рисунок 1.12 – Тренажер оператора

У цьому завданні керований об'єкт розглядається як технічний засіб, що містить двигун з керованою оператором силою тяги, яка зумовлює рух, яка визначається положенням органу управління, а також прилад вимірювання і індикації швидкості руху.

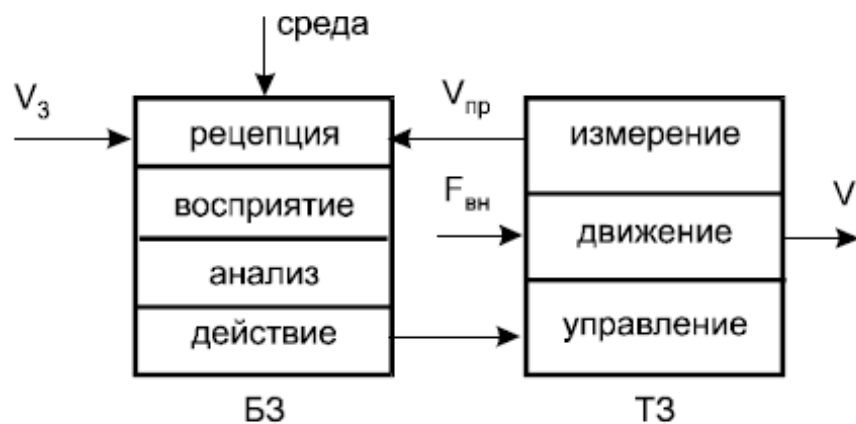


Рисунок 1.13 – Взаємозв'язок функцій технічної і біологічної ланок БТС

У розглянутих умовах завдання оператор здійснює такі функції (рисунок 1.13):

- рецепцію зорової інформації про цілевказання швидкості і швидкості руху об'єкта за показниками приладу;
- сприйняття зорової інформації, аферентний синтез і прийняття рішення;
- формування управляючого впливу - переміщення органу управління швидкістю об'єкта для зміни швидкості його руху.

Ефективність БТС ергатичній типу визначається в термінах технічної ланки. В даному випадку ефективність системи можна оцінити за якістю перехідного процесу встановлення швидкості руху об'єкта, наприклад, по тривалості встановлення швидкості руху і помилці управління або за величиною відстані пройденого об'єктом за час перехідного процесу. Чим менше тривалість встановлення швидкості, чим менше помилка управління і чим менше відстань встановлення, тим ефективніше вирішується поставлене завдання управління швидкістю руху.

1.51 Методи класичної теорії управління для моделювання БТС

Застосуємо для моделювання системи методи класичної теорії управління. Припустимо, що розглянута система є лінійною і стаціонарної. В цьому випадку для дослідження динаміки системи досить знайти її опис у вигляді передавальної функції, що дозволяє визначити поведінку системи для заданих зовнішніх впливів. З точки зору класичної теорії управління дана БТС може розглядатися як система, що стежить з негативним зворотним зв'язком.

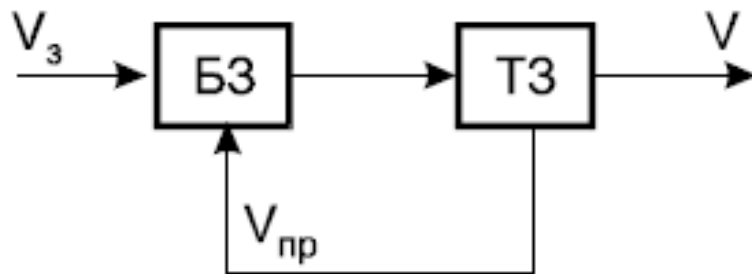


Рисунок 1.14 – Структура БТС як системи, що стежить з негативним зворотним зв'язком

Дійсно, управління швидкістю руху об'єкта здійснюється всякий раз, коли оператор вирішує встановити швидкість руху V_z , задану цілевказом. Необхідна швидкість руху V_z , визначається в результаті зорового сприйняття значення швидкості, висунутого оператору, а фактичне значення швидкості руху - в результаті сприйняття показань приладу $V_{пр}$.

В результаті порівняння значень V_z і $V_{пр}$ в центральній нервовій системі виробляється рішення про певну керуючу дію, яка через ефекторну систему передається відповідним м'язам руки, яка розташована на ручці управління. При скороченні м'язів

відбувається рух ручки і зміна її положення L . Зміна положення ручки управління призводить до зміни швидкості руху об'єкта.

У найзагальнішому вигляді структура БТС може бути представлена у вигляді системи з негативним зворотним зв'язком (рисунок 1.14). Біологічна ланка розглянутої ергатичній БТС виконує функції реценції, сприйняття, аферентного аналізу середовища, візуально-моторного взаємодії, що виражається у вигляді скорочення відповідних м'язів руки, що призводять до руху ручки управління параметрами руху об'єкта.

Технічна ланка здійснює рух, вимірювання і індикацію швидкості, керування швидкістю руху в залежності від положення ручки управління.

1.52 Біологічна ланка, яка може бути представленою за допомогою суматора

Біологічна ланка може бути представлена за допомогою суматора (рисунок 1.15), на який надходить інформація від рецепторів, що формує сигнал "помилки" V_e і блоку 1, вхідною змінною якого служить сигнал "помилки" V_e , вихідною - положення ручки управління L .

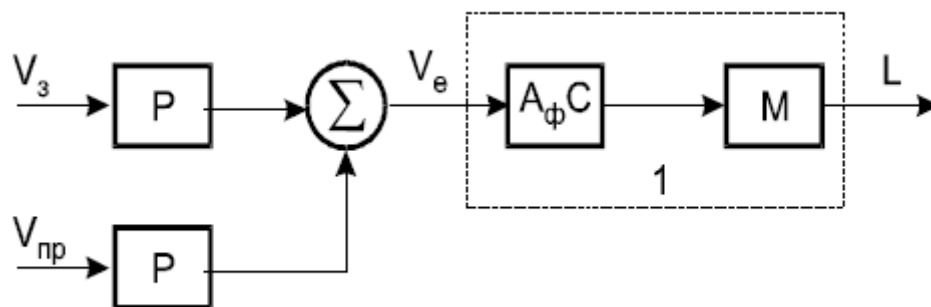


Рисунок 1.15 – Структура біологічної ланки БТС

У режимі управління модель біологічної ланки повинна представляти процеси аферентного аналізу середовища та взаємодії зорового аналізатора і рухової відповіді.

Для дослідження системи необхідно визначити опис блоків, що входять в ланки системи. Модель технічної ланки можна записати на підставі відомих співвідношень, що описують процеси руху об'єкта під дією сили тяги двигуна, вимірюванні та індикації швидкості руху, керуванні швидкістю руху в залежності від положення органу управління.

Модель біологічної ланки може бути знайдена шляхом тестування оператора на спеціальному тренажері, який імітує реальну роботу оператора (рисунок 1.16). Апаратно-

програмний комплекс тренажера містить дисплей, на якому відображається траєкторія руху об'єкта, відображається поточна швидкість руху і цілевказування швидкості, а також орган управління параметрами руху.

Функціональна ідентифікація оператора, як ланки розглянутої БТС, показує, що для його опису за допомогою передавальної функції можна скористатися передавальними функціями двох типових ланок - ланки з чистим запізненням (аферентних синтез) і інерційної аперіодичної ланки (рухова відповідь):

$$H_1(p) = \frac{L(p)}{V_e(p)} \quad (1.9)$$

$$H_1(p) = \frac{K_1}{1 + T_{11}p} e^{-pT_{12}} \quad (1.10)$$

де:

K_1 – статичний коефіцієнт передачі ланки;

T_{11} – постійна часу аферентного синтезу;

T_{12} – постійна часу рухового відповіді..

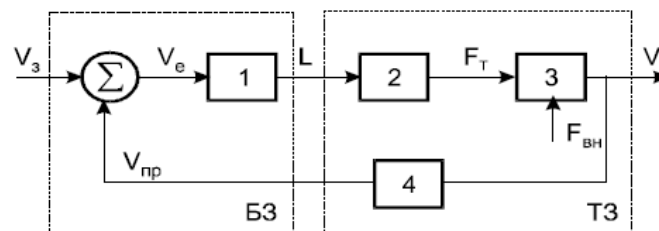


Рисунок 1.16 – Структурно-функціональна схема досліджуваної БТС

Технічна ланка системи включає блок двигуна 2 з передавальною функцією, яка описує перетворення положення ручки управління L в величину сили тяги двигуна

$$H_2(p) = \frac{F_T(p)}{L(p)} \quad (1.11)$$

F_T :

Виконавчий пристрій управління силою тяги двигуна об'єкта дозволяє замкнути контур зворотного зв'язку системи.

Вхідним сигналом тут є положення органу управління L . Під дією виконавчого пристрою двигун виробляє силу тяги, що розглядається в якості вихідної величини блоку 2.

Передавальна функція блоку 3 описує перетворення діючої на об'єкт сили тяги F_T в швидкість руху V :

$$H_3(p) = \frac{V(p)}{F_T(p)} \quad (1.12)$$

Рішення в першому наближенні рівняння руху об'єкта: із зовнішніх сил, що діють на об'єкт масою m , враховується тільки сила тертя F_{TP} (вираз 1.13), призводить до передавальної функції, що має вигляд (вираз 1.14).

$$m(dV/dt) = F_T - F_{TP} \quad (1.13)$$

$$H_3(p) = \frac{K_3}{1 + pT_3} \quad (1.14)$$

де: K_3 – статичний коефіцієнт передачі ланки, T_3 – постійна часу руху.

Перетворення швидкості руху V в показання значення швидкості на дисплеї V_{np} описує передавальна функція блоку 4:

$$H_4(p) = \frac{V_{np}(p)}{V(p)} \quad (1.15)$$

Передавальна функція системи може бути записана через передавальні функції блоків:

$$H(p) = H_1(p)H_2(p)H_3(p)/[1 + H_1(p)H_2(p)H_3(p)H_4(p)] \quad (1.16)$$

Моделювання БТС з використанням передавальних функцій окремих ланок системи і завдання їх параметрів дозволяє досліджувати характеристики БТС як системи управління. Для цієї мети може бути використаний пакет моделювання динамічних систем (наприклад, математичний пакет MATLAB). За результатами дослідження можна отримати перехідні характеристики системи і визначити параметри її ефективності.

Дослідження БТС з використанням характеристик реальних операторів дозволяє відпрацювати структуру і характеристики елементів, що входять в технічну ланку БТС, отримати рекомендації по відбору, навчання і тренування операторів з точки зору підвищення ефективності даної системи. На малюнку 1.17 показані типові перехідні процеси встановлення швидкості руху для випадку ступеневого цілевказання швидкості.

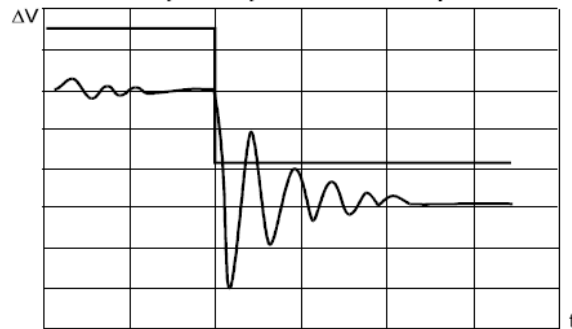


Рисунок 1.17 – Процес встановлення швидкості руху керованого об'єкта при ступінчастому цілевказання швидкості

Дослідження окремих блоків системи дозволяє визначити їх вплив на показники ефективності системи. Таким чином, модель БТС, отримана методами класичної теорії управління, дозволяє досліджувати основні закономірності функціонування БТС, а також шляхи підвищення ефективності оператора, як ланки людино-машинної системи.

1.53 Основні положення теорії ідентифікації

Ідентифікація - це знаходження еквівалентної системи деякого заданого класу вхідних і вихідних даних. Еквівалентність моделі передбачає її об'єктивну відповідність з модельованим об'єктом, а також здатність заміщати об'єкт, давати інформацію, яка допускає дослідну перевірку.

Особливістю моделювання біологічних об'єктів, що входять в БТС в якості біологічних ланок, є формалізація досліджуваних фізіологічних процесів у вигляді, що відповідають з описом технічним ланкам системи.

Для вирішення цього завдання доцільно при описі біологічних об'єктів вибирати атрибути, що характеризують взаємодію біологічних і технічних ланок, наприклад, вхідні, вихідні змінні, власні параметри, що дозволяє отримати опис біологічного об'єкта в формі сумісній з описом технічних засобів. Тоді при описанні технічних ланок стає можливим використання відповідних атрибутів біологічної ланки.

Наприклад, при формуванні медичних БТС (рисунок 1.18), в яких в якості біологічної ланки розглядається одна з фізіологічних систем організму, що визначає його поточний стан, модель фізіологічної системи доцільно представити у вигляді опису залежності показників, що характеризують стан пацієнта (вихідні змінні) від показників лікувального впливу (вхідні змінні).

Параметри лікувальної дії, що формуються технічними засобами БТС і описувані як вихідні змінні технічної ланки, можуть бути використані при описанні фізіологічної системи організму в якості вхідних змінних. Параметри стану, які є вихідними змінними при описанні фізіологічної системи, можуть бути використані в якості вхідних змінних при описанні пристроїв обробки та отримання діагностичних показників.

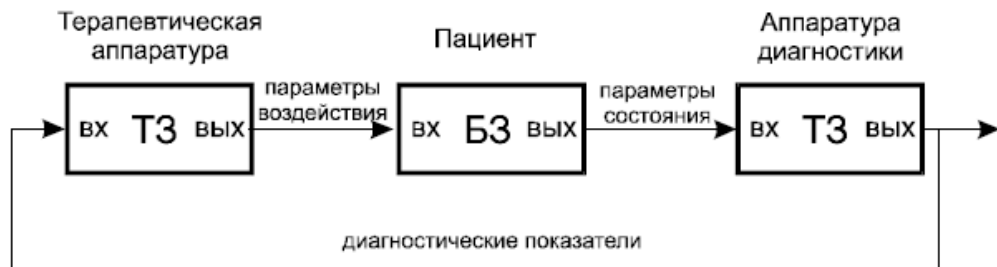


Рисунок 1.18 – Зв'язок змінних у медичній БТС

Таким чином, завдання біологічної ланки в термінах «вхід - вихід - стан» дозволяє досить просто провести опис БТС в цілому. Побудова моделей біологічних ланок БТС, що відрізняються складністю і багатозв'язністю, здійснюється методами функціональної і структурної ідентифікації.

1.54 Функціональна ідентифікація

Функціональна ідентифікація дозволяє описати поведінку об'єкта шляхом обробки результатів його тестування, тобто впливу на нього за допомогою стимулу і реєстрації викликаної реакції. Для функціональної ідентифікації необхідна наявність експериментальних даних про поведінку системи при різних вхідних впливах. Об'єкт представляється у вигляді "чорної скриньки", а метою дослідження найчастіше є визначення його передавальних характеристик. Причому вид тестуючого впливу і його параметри визначають вид одержуваної передавальної характеристики.

Тестування об'єкта на певному рівні біологічної ієрархії визначає рівень одержуваної моделі. Наприклад, в неврологічній діагностиці при визначенні рівня нейром'язової провідності тестування нейром'язової передачі здійснюється за допомогою електричних стимулів подібних до природної біоелектричної активності. Це визначає описання процесу перетворення стимулюючого впливу в характеристики м'язового скорочення, за якими визначається діагностичний показник нейром'язової передачі - порогова інтенсивність стимулу. Фізико-хімічні процеси утворення медіаторів нейром'язової передачі в цій моделі не описуються.

1.55 Структурна ідентифікація

Структурна ідентифікація дає можливість встановити, як взаємодіють окремі компоненти об'єкта в процесі формування його поведінки. Структурна ідентифікація пов'язана з вивченням механізмів функціонування, способів організації і внутрішньої будови біологічних ланок БТС. Одним з можливих шляхів дослідження структурної організації біологічних ланок є анатомічне, фізіологічне вивчення об'єкта, уявлення його у вигляді окремих складових, опис біофізичних і біохімічних механізмів функціонування цих складових.

В окремих випадках, механізм функціонування досліджуваного об'єкта передбачається відомим. Тоді виникає можливість зробити припущення про клас функціонального описання поведінки об'єкта (у вигляді рівняння моделі, параметри якого залишаються невідомими). У цьому випадку завдання ідентифікації об'єкта зводиться до задачі оцінювання параметрів рівняння моделі.

Функціональна ідентифікація передбачає визначення передавальної функції об'єкта, не даючи інформації про внутрішню будову. Однак, у мірі того, як стає можливим спостереження більшого числа змінних, що описують стан об'єкта, можуть виявлятися приховані раніше компоненти.

Об'єкт може бути розбитий на частини, тобто може бути проведена декомпозиція "чорної скриньки". Таким чином, можливо чергування функціональної і структурної ідентифікації об'єкта.

1.56 Тестування об'єкта з допомогою сигналів, які дозволяють визначити його передавальну функцію

Функціональна ідентифікація може бути реалізована за допомогою методів, заснованих на тестуванні об'єкта за допомогою сигналів, що дозволяють визначити його передавальну функцію. В якості тестових сигналів використовуються синусоїдальний, ступеневий, імпульсний або шумовий вплив.

Обробка реакцій, викликаних тест-впливом, за допомогою методів, заснованих на перетворенні Фур'є, дозволяє знайти частотну характеристику, далі передавальну функцію об'єкта і перейти до опису поведінки об'єкта у вигляді диференціальних рівнянь.

Метод простору станів дозволяє представити модель, що описується передаточною функцією, у вигляді системи диференціальних рівнянь першого ступеня, які часто мають цілком певний біофізичний сенс. Інтерпретація цих рівнянь за допомогою камерних моделей дозволяє в ряді випадків від моделювання біологічних об'єктів перейти до структурного моделювання, що характеризує механізми процесів, які відбуваються.

Чисельні параметричні методи ідентифікації є пошуковими методами, за допомогою яких шляхом перебору значень параметрів можна визначити модель об'єкта, що описує взаємодію атрибутів. До даних методів належать методи інваріантного занурення, послідовного навчання, а також евристичні методи ідентифікації.

Таким чином, результатом ідентифікації біологічних ланок БТС є отримання опису їх функціонування у вигляді сумісного з описом технічних ланок для формування моделі БТС в цілому.

Методи оцінки параметрів моделі.

В цілому ряді випадків ідентифікації біологічних об'єктів, що розглядаються в якості ланок БТС, вважається відомим вид функціонального зв'язку вихідних і вхідних атрибутів об'єкта, що моделюється. Тоді експериментальні дані, отримані в результаті дослідження об'єкта, можуть бути безпосередньо використані для завдання його формального опису. У разі статичних систем для відшукування математичної моделі у формі функціональної залежності, що "найкращим" чином задовольняє експериментальним даним, може використовуватися регресійний аналіз. Для моделювання динамічних систем, коли відомим вважається механізм процесу і диференціальне рівняння, що його описує, завдання зводиться до визначення параметрів даного рівняння.

Статична задача оцінювання параметрів моделі зводиться до вибору виду функціональної залежності, яка описує експериментальні дані, і її аналітичне описання,

тобто до підбору функції і визначення її параметрів. У регресійному аналізі для моделювання використовуються степеневі, показові, дрібно-раціональні функції. Вибір виду функції може бути обумовлений відомим характером досліджуваного процесу, відомими механізмами функціонування системи.

Критерій "найкращого" опису системи за допомогою обраної функціональної залежності полягає в мінімізації відхилень математичної моделі від експериментальних даних. Для цієї мети може бути використаний ряд методів, серед яких найбільш часто застосовується метод найменших квадратів. Даний метод полягає в знаходженні значень параметрів моделі, які мінімізують суму квадратів відхилень експериментальних даних від відповідних значень обраної функції.

1.57 Методики ідентифікації системи на основі аналізу перехідної функції

Передавальна функція системи може бути визначена шляхом безпосереднього аналізу форми графічного запису перехідної функції досліджуваного об'єкта, що представляє собою реакцію системи на тестовий вплив. Подібно до методу Боде, в частотній області є набір графіків перехідних функцій відповідних реакцій елементарних ланок на тестовий вплив.

Ідентифікація в даному випадку зводиться до визначення виду і параметрів передавальної функції, якій відповідає перехідна функція, що апроксимує графічний запис реакції об'єкта. Такий підхід використовується для наближеної ідентифікації систем першого і другого порядків і аперіодических систем вищого порядку.

Приклад 1. Ланка першого порядку.

Передавальна функція ланки може бути записана у

$$H(p) = \frac{K}{1 + pT} \quad (1.17)$$

вигляді:

Імпульсна перехідна функція даної ланки має

$$h(t) = \frac{K}{T} \exp(-t/T) \quad (1.18)$$

вигляді:

Графічний аналіз перехідної функції системи першого порядку дозволяє отримати значення статичного коефіцієнта передачі K і постійної часу T .

Величину постійної часу можна отримати на підставі аналізу запису перехідної функції як відрізок часу, за який графік перехідної функції досягає 63% своєї усталеної величини.

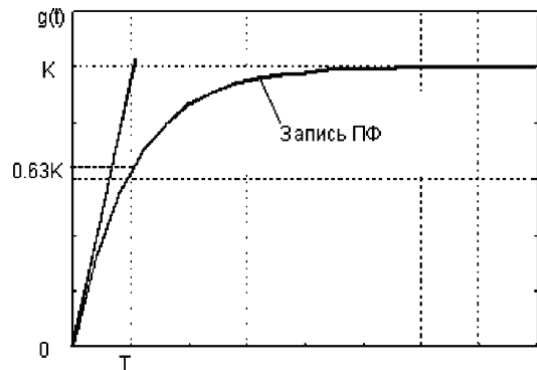


Рисунок 1.19 – Графічна ідентифікація системи першого порядку по запису перехідної функції

Таким чином, постійну часу ланки першого порядку можна визначити по точці на осі часу, що відповідає перетинанню двох прямих. Перша пряма - дотична, проведена до графіка перехідної функції на початковій ділянці, друга пряма відповідає сталому рівню коефіцієнта передачі.

Особливістю використання для ідентифікації імпульсної перехідної функції системи є необхідність екстраполяції кривої в області малих часів. Це викликано тим, що з-за кінцевих параметрів тест сигналу графік імпульсної перехідної функції не починається з величини K / T .

Аналогічно випадку перехідної функції, постійна часу ланки першого порядку може бути знайдена за рівнем $0,37 K/T$ або за допомогою методу дотичній в області малих часів (рисунок 1.20).

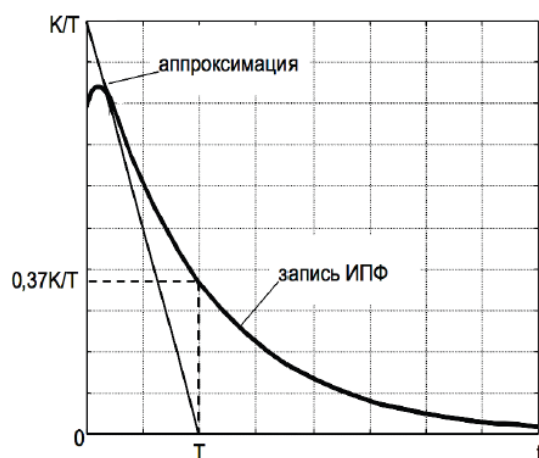


Рисунок 1.20 – Графічна ідентифікація системи першого порядку по запису імпульсної перехідної функції

Приклад 2. аперіодичної ланки другого порядку

Передавальна функція такої системи може бути записана у

$$H(p) = \frac{A_1}{(1 + pT_1)} + \frac{A_2}{(1 + pT_2)}$$

вигляді:

Приклад 3. Коливальна загасаюча ланка другого порядку

Передавальна функція системи може бути записана у

$$H(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1}$$

де: $0 < \xi < 1$.

вигляді:

Приклад 4. Аперіодические системи вищого порядку.

Для графічної ідентифікації аперіодических систем високого порядку може бути використаний метод узагальненої передавальної функції. Відповідно до цього методу передавальна функція з n різними постійними часу може бути апроксимована функцією передачі n -ого порядку з узагальненої постійної часу $T_{об}$.

$$H(p) = \frac{K}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p) \dots (1 + T_n p)} \approx \frac{K}{(1 + pT_{об})^n}$$

Завдання ідентифікації зводиться до визначення узагальненої постійної часу і порядку передавальної функції. Для цієї мети використовуються нормовані графіки і номограми, що наводяться у відповідній літературі.

1.58 Метод простору станів

Метод простору станів. Моделювання біологічних ланок БТС за допомогою методів функціональної ідентифікації часто призводить до передавальних функцій, які визначають опис поведінки системи у вигляді диференціальних рівнянь високого порядку.

Це обумовлено складною динамікою процесів, що відбуваються в біологічних системах, пов'язаних зі структурною і функціональною різноманітністю компонентів системи, що беруть участь у формуванні механізмів її поведінки. Зокрема, для фізіологічних систем організму людини характерним є одночасна робота декількох груп біологічних регуляторів, що мають різну швидкодію і неоднакове число ступенів свободи.

Наприклад, регуляція артеріального тиску крові знаходиться під впливом вегетативної нервової системи і ендокринногуморальних факторів. У подібних випадках

для моделювання системи зручно скористатися методом простору станів, що дозволяє уявити лінійне диференціальне рівняння високого порядку, що описує динаміку системи, у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку відносно деяких штучно введених перемінних, які називаються змінними стану, за допомогою яких можна охарактеризувати стан системи.

У біології та медицині поняття стану формувалося як якісне визначення узагальненої характеристики системи, пов'язане з її показниками. Спостереження за зміною фізіологічних параметрів організму пацієнта (температурою, ЧСС, артеріальним тиском, сатурацією крові киснем і т.п.) дозволяє судити про відхилення параметрів від норми і класифікувати клінічний стан пацієнта за ступенем тяжкості. В екології поняття стану системи пов'язують з будь-якої інтегральною характеристикою середовища, наприклад, токсичністю, мутагенністю, канцерогенністю і т.п.

У теорії систем під станом динамічної системи розуміється мінімальний набір даних, який необхідно поставити в певний момент часу, щоб в рамках математичного опису системи можна було передбачити поведінку системи в будь-який інший час після цього часу. Використання поняття стану системи дозволяє в рамках моделювання біологічних систем методом простору станів строго визначити вектор стану, що повністю описує поведінку системи. Змінні стану моделі, що мають формальний математичний вираз, який виходить, наприклад, при розкладанні диференціального рівняння вищого порядку на систему рівнянь стану, можуть мати цілком певний біофізичний або фізіологічний сенс.

Такий підхід дозволяє найбільш повно описати моделюєму систему, а в ряді випадків, за допомогою методів структурної ідентифікації уявити механізми, що лежать в основі поведінки системи. Вибір змінних стану при моделюванні системи залежить від функціонального класу досліджуваних моделей. При моделюванні фізіологічних систем організму, що є біологічними ланками терапевтичних БТС, модель, що описує зв'язок параметрів лікувального впливу і діагностичних показників пацієнта, можна віднести до класу моделей об'єктів управління. Тоді вектор стану моделі можна сформувати з внутрішніх параметрів фізіологічної системи, що характеризують біофізичні механізми процесів лікувального впливу. Це дозволяє отримати адекватний опис процесів в біологічній ланці з точки зору аналізу алгоритмів управління, формування ефективних параметрів впливу, вибору структури технічних ланок БТС і їх характеристик. Опис моделі в просторі станів дається у формі рівнянь «вхід - стан - вихід»:

$$\begin{cases} \dot{Z} = AZ + BX \\ Y = CZ + DX \end{cases}$$

де: X – вектор вхідних впливів; Y – вектор вихідних реакцій; Z – вектор стану; A, B, C, D – матриці коефіцієнтів.

Перше рівняння системи (2.91) диференціальне, воно визначає стан системи, тобто задає її динамічні властивості.

Друге рівняння - алгебраїчне, визначає вихідну реакцію системи через її поточний стан. Компоненти вектора стану - змінні стану визначаються на виходах інтеграторів схеми моделі, що відповідають рівнянням (рис. 1.21).

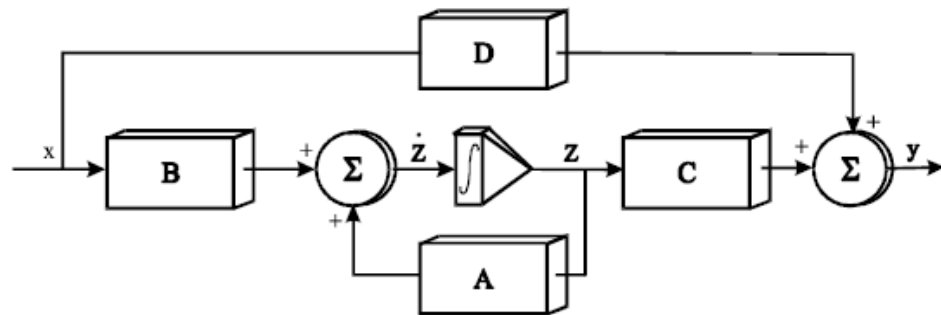


Рисунок 1.21 - Блок-схема моделі, яка відповідає рівнянням «вхід - стан - вихід»

Для біологічних систем уявлення змінних стану у вигляді фазових координат виявляється зручним, так як дозволяє представити широкий клас моделей, що описують співвідношення темпів і рівнів компонентів системи. До подібних моделей можна віднести опис процесів обміну, накопичення і витрачання речовини і енергії у відкритих системах.

Завдання рівнів компонентів в розглянутих системах виявляється достатнім для визначення темпів що відбуваються в них процесів, за умови, що є опис моделі системи і умов середовища, в якій вона знаходиться. Таким чином, вектор стану системи повністю описує поведінку системи і характеризує її стан.

2 Практичні роботи в MATLAB та SIMULINK

2.1 Задача поліномів у вигляді вектора рядку

Задайте поліном $p(s) = s^3 + 3s^2 + 4$ у вигляді вектора рядку.

Передаточна функція представляє собою відношення двох поліномів, ми спочатку розглянемо, як MATLAB оперує з алгебраїчними поліномами. При цьому не будемо забувати, що в передаточній функції повинні бути задані обидва поліноми - і у чисельнику, і в знаменнику. Поліноми в MATLAB представляються у вигляді векторів-рядків, що складаються з коефіцієнтів в зворотному порядку ступенів.

Наприклад, поліном $p(s) = s^3 + 3s^2 + 4$ задається в такий спосіб.

```
>> p=[1 3 0 4]; ←————  $p(s) = s^3 + 3s^2 + 4$ 
```

Зверніть увагу, що навіть якщо коефіцієнт при якомусь ступені дорівнює нулю, він однаково враховується при вводі полінома p(s).

2.2 Обчислення коренів поліномів

Обчисліть корені полінома $p(s) = s^3 + 3s^2 + 4$

Якщо **p** є вектор-рядок, що складається з коефіцієнтів **p(s)** у порядку зменшення ступенів, то функція **roots(p)** визначає вектор-стовпець, що містить корені цього полінома. І навпаки, якщо **r** - вектор-стовпець, що містить корені полінома, то функція **poly(r)** дає вектор-рядок з коефіцієнтів полінома в порядку зменшення ступенів.

Так, корені полінома $p(s) = s^3 + 3s^2 + 4$ можна обчислити таким чином:

```
>> r=roots(p) ←———— Обчислення коренів
r =                                      $p(s) = 0$ 
-3.3553
 0.1777 + 1.0773i
 0.1777 - 1.0773i
```

Поліном можна відновити за його коренями за допомогою функції **poly**:

```
>> p=poly(r) ←———— Відновлення полінома за
p =                                     його коренями
 1.0000   3.0000   0.0000   4.0000
```

2.3 Множення поліномів

Помножте два полінома $3s^2 + 2s + 1$ та $s + 4$, щоб отримати поліном $n(s)$

Множення поліномів виконується за допомогою функції **conv**. Припустимо, що ми хочемо одержати поліном **n(s)**, де **n(s) = (3s² + 2s + 1)(s + 4)**. Ця процедура виконується так:

```
>> p=[3 2 1];q=[1 4];
>> n=conv(p,q)
n =
     3     14     9     4
```

У результаті множення одержуємо поліном

$$n(s) = 3s^3 + 14s^2 + 9s + 4.$$

2.4 Обчислення значення полінома при заданому значенні змінної

Обчисліть значення полінома $n(s) = 3s^3 + 14s^2 + 9s + 4$ при заданому значенні змінної ($s=-5$).

Для обчислення значення полінома при заданому значенні змінної використовується функція **polyval**.

```
>> v=polyval(n,-5)

v =
    -66
```

Таким чином, поліном **n(s)** має значення **n(-5) = -66**.

2.5 Задача передаточної функції

В MATLAB задайте передаточну функцію

$$W_1(s) = \frac{0,1s + 1}{s^2 + 0,2s + 1}$$

Передаточні функції систем створюються за допомогою функції **tf**.

їх можна задати в такий спосіб:

```
>> num1=[0.1 1]; den1=[1 0.2 1];
```

```
>> W1=tf(num1,den1)

Transfer function:
    0.1 s + 1
-----
    s^2 + 0.2 s + 1
```

Тут **num1** і **den1** – чисельник і знаменник передаточної функції **W₁(s)** відповідно. Таким чином, в MATLAB передаточна функція задається як відношення поліномів. У принципі, чисельник і знаменник передаточної функції можна задавати не окремо, а безпосередньо з функцією **tf**:

```
>> W1=tf([0.1 1],[1 0.2 1])

Transfer function:
    0.1 s + 1
-----
    s^2 + 0.2 s + 1
```

2.6 Задача передаточної функції як раціональної функції змінної

Задайте передаточну функцію

$$W_2(s) = \frac{1}{s+1}.$$

як раціональну функцію змінної «s»

Передаточну функцію можна також задати як раціональну функцію змінної «s»:

```
>> s=tf('s');
>> W=1/(s+1)
Transfer function:
    1
-----
    s + 1
```

2.7 Визначення загальної передаточної функції, що зв'язує послідовне з'єднання двох ланок

За допомогою МАТЛАБ визначіть загальну передаточну функцію W(s), що зв'язує послідовне з'єднання двох ланок

$$W_1(s) = \frac{2}{s+1} \text{ і } W_2(s) = \frac{0,5}{2s+1},$$

Одержавши моделі окремих ланок системи, необхідно об'єднати всі ці ланки в єдину структуру, створивши тим самим систему керування. За допомогою MATLAB можна виконати всі необхідні перетворення структурної схеми. Як приклад розглянемо перетворення схем, ланки яких задані у вигляді передаточних функцій.

Найпростішим є послідовне з'єднання ланок (рис.2.1).

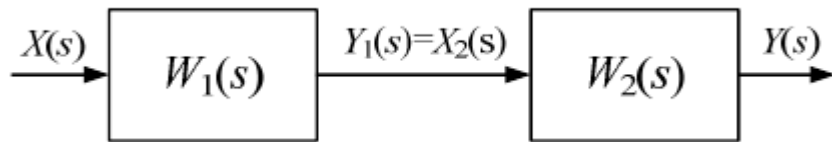


Рисунок 2.1 - Послідовне з'єднання ланок

Загальну передаточну функцію $W(s)$, що зв'язує $X(s)$ і $Y(s)$, можна знайти, використовуючи команду **series**.

```
>> W1=tf(2,[1 1]);
>> W2=tf(0.5,[2 1]);
>> W=series(W1,W2)
```

```
Transfer function:
      1
-----
2 s^2 + 3 s + 1
```

2.8 Визначення загальної передаточної функції, що зв'язує паралельне з'єднання двох ланок

За допомогою МАТЛАБ визначіть загальну передаточну функцію $W(s)$, що зв'язує паралельне з'єднання двох ланок

$$W_1(s) = 1,2 \text{ і } W(s) = \frac{0,5}{s},$$

У структурних схемах дуже часто зустрічається паралельне з'єднання елементів (рис. 2.2).

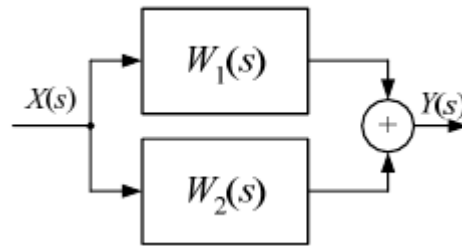


Рисунок 2.2 - Паралельне з'єднання ланок

У таких випадках для визначення передаточної функції з'єднання використовується функція **parallel**.

```
>> W1=tf(1.2,1);
>> W2=tf(0.5,[1 0]);
>> W=parallel(W1,W2)
```

Transfer function:

$$\frac{1.2s + 0.5}{s}$$

2.9 Визначення передаточної функції замкнутої системи з одиничним зворотнім зв'язком

За допомогою МАТЛАБ визначить передаточну функцію $W(s)$ замкнутої системи з одиничним зворотнім зв'язком. Передаточні функції об'єкта $W_o(s)$ і регулятора $W_p(s)$ (рис.2.3) дорівнюють

$$W_o(s) = \frac{1}{2s^2 + 3s + 1} \text{ і } W_p(s) = \frac{1,2s + 0,5}{s}.$$

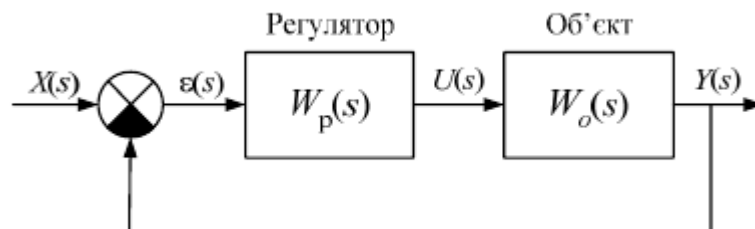


Рисунок 2.3 - Структурна схема з одиничним зворотним зв'язком
 Передаточна функція замкнутої системи визначається виразом

$$W(s) = \frac{W_1(s)}{1 \pm W_1(s)W_{зз}(s)},$$

де знак «+» ставиться у випадку негативного зворотного зв'язку, а знак «-» - у випадку позитивного зворотного зв'язку.

Обчислити передаточну функцію замкнутої системи можна за допомогою функції **feedback**. Ця функція застосовна як до одноконтурних, так і до багатоконтурних систем керування.

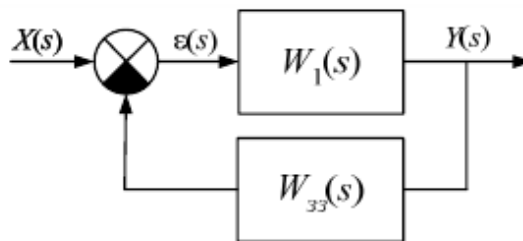


Рисунок 2.4 - Система керування зі зворотним зв'язком

У випадку неединичного зворотного зв'язку функція **feedback** має наступний формат:

$$W = \text{feedback}(W1, W_{зз}, \text{sign}),$$

коли замкнута система має одиничний зворотний зв'язок то Формат функції **feedback** у цьому випадку має вигляд:

де **sign** = +1 у випадку позитивного зворотного зв'язку і **sign** = -1 - у випадку негативного зворотного зв'язку.

Якщо в аргументах функції **feedback** не зазначений знак зворотного зв'язку **sign**, то за замовчуванням він передбачається негативним.

Часто зустрічається випадок, коли замкнута система має одиничний зворотний зв'язок. Формат функції **feedback** у цьому випадку має вигляд:

$$W = \text{feedback}(W1, 1, \text{sign})$$

наприклад, передаточні функції об'єкта $W_o(s)$ і регулятора $W_p(s)$ на рис. 2.5 дорівнюють

$$W_o(s) = \frac{1}{2s^2 + 3s + 1} \text{ і } W_p(s) = \frac{1,2s + 0,5}{s}.$$

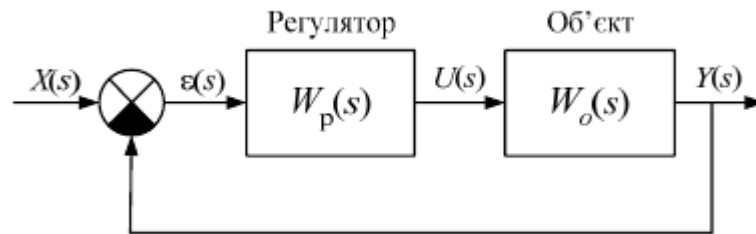


Рисунок 2.5 Структурна схема зі зворотним зв'язком

Тоді передаточна функція замкнутої системи:

```
>> Wo=tf(1,[2 3 1])
>> Wp=tf([1.2 0.5],[1 0])
>> W=feedback(Wp*Wo,1)
```

Transfer function:

$$\frac{1.2 s + 0.5}{2 s^3 + 3 s^2 + 2.2 s + 0.5}$$

2.10 Визначення стійкості системи за характеристичним поліномом

Визначити стійкість системи за характеристичним поліномом який має вигляд

$$A(s) = s^3 + s^2 + 2s + 23$$

Основне питання аналізу системи керування – це питання її стійкості. У більшості випадків нестійка система непрацездатна.

Стійкою є така система, що після обмеженого обурюючого впливу повертається до вхідного стану.

Для стійкості лінійної системи необхідно й достатньо, щоб всі корені характеристичного полінома лежали ліворуч від мнімої вісі комплексної площини коренів. Отже, мніма вісь комплексної площини є границею стійкості. Якщо хоча б один речовинний корінь або пара комплексно сполучених коренів перебуває праворуч від

мнимої вісі, то система є нестійкою. Якщо є нульовий корінь або пара чисто мнимих коренів, то система вважається нейтральною (тій, що перебуває на границі стійкості).

За допомогою функції **roots** знаходити корені якого-небудь полінома. Наприклад, якщо характеристичний поліном має вигляд

$$A(s) = s^3 + s^2 + 2s + 23,$$

то його корені можна визначити таким чином:

```
>> A= [1 1 2 23];
>> roots(A)
ans =
-2.9558
0.9779 + 2.6124i
0.9779 - 2.6124i
```

Як бачимо, запропонована система буде нестійкою.

2.11 Обчислення полюсів передаточної функції

Обчислити полюси передаточної функції **W(s)** в якій чисельник і знаменник у вигляді вектора рядка дорівнюють відповідно

```
num1= [1 0.2] і den1 =[1 1 2 23]
```

Якщо задано передаточну функцію, то можна скористатися функцією **pole**, що обчислює полюси передаточної функції:

```
>> num1= [1 0.2];
>> den1 =[1 1 2 23];
>> W=tf(num1,den1)

Transfer function:
      s + 0.2
-----
s^3 + s^2 + 2 s + 23

>> pole(W)

ans =

-2.9558
0.9779 + 2.6124i
0.9779 - 2.6124i
```

2.12 Вказання розташування полюсів і нулів передаточної функції на комплексній площині

Вказати на комплексній площині розташування полюсів і нулів передаточної функції $W(s)$ в якій чисельник і знаменник у вигляді вектора рядка дорівнюють відповідно **num1** = [1 0.2] і **den1** =[1 1 2 23]

За допомогою функції **pzmap** можна вказати розташування на комплексній площині полюсів і нулів передаточної функції. Нулі на діаграмі позначаються кружечками, а полюси - хрестиками. Якщо функція **pzmap** викликається без аргументів, то діаграма будується автоматично

```
>> num1= [1 0.2];
>>den1 =[1 1 2 23];
>> W=tf(num1,den1);
>> pzmap(W)
```

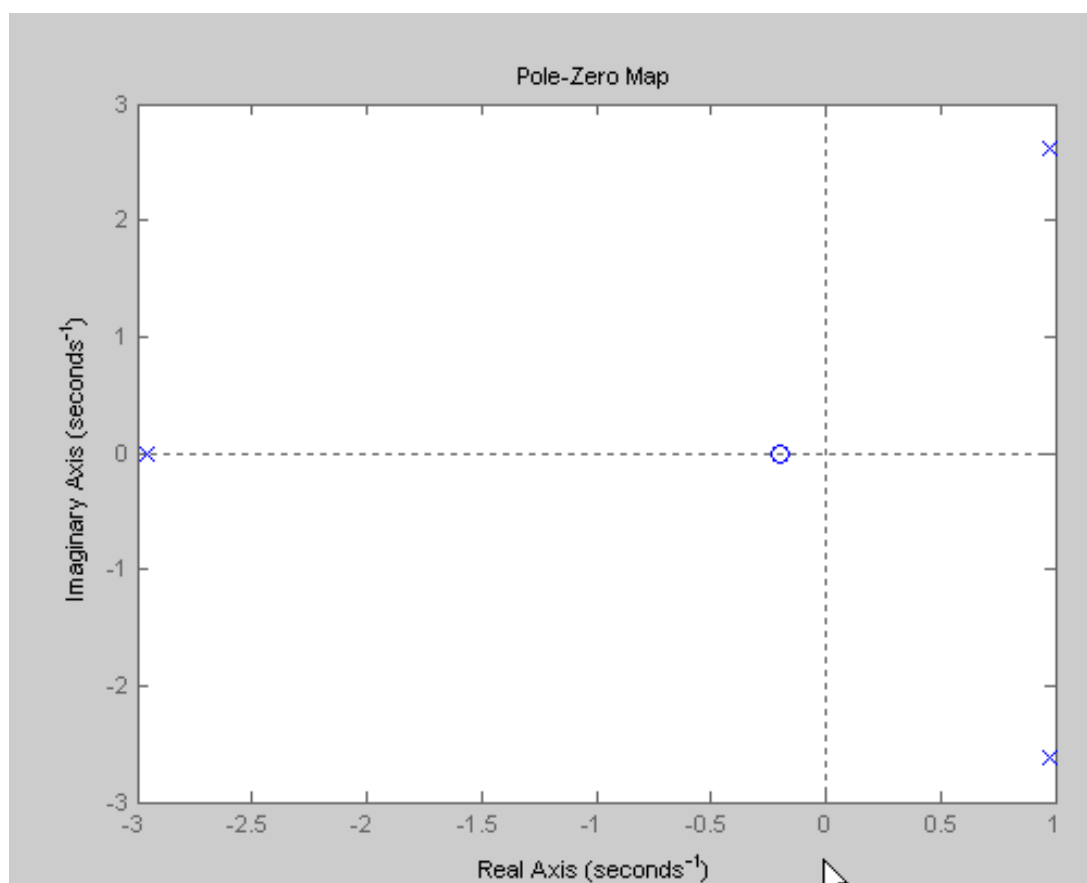


Рисунок 2.6 - Результат виконання команди **pzmap**

2.13 Визначення стійкості системи керування

Визначити стійкість системи керування показаної на рис.2.7.

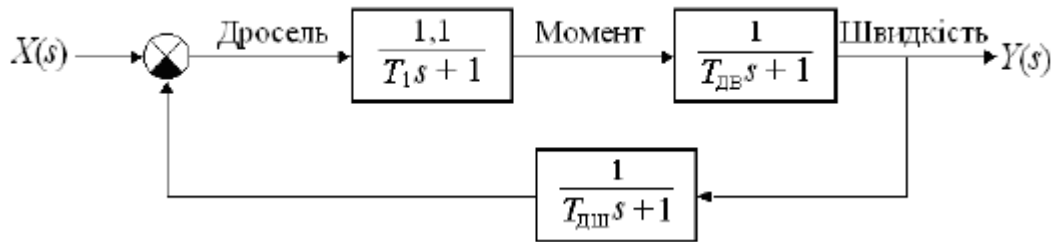


Рисунок 2.7 - Система керування числом обертів двигуна внутрішнього згоряння

Постійна часу T_1 обумовлена обмеженнями на упорскування пального в карбюратор і пропускну здатність трубопроводу ($T_1=1$). Двигун має постійну часу $T_{дв} = J/b = 3$ с, де J – момент інерції, b – коефіцієнт тертя вала. Постійна часу датчика швидкості $T_{дш} = 0,4$ с.

Постійна часу T_1 обумовлена обмеженнями на упорскування пального в карбюратор і пропускну здатність трубопроводу. Двигун має постійну часу $T_{дв} = J/b = 3$ с, де J – момент інерції, b – коефіцієнт тертя вала. Постійна часу датчика швидкості $T_{дш} = 0,4$ с.

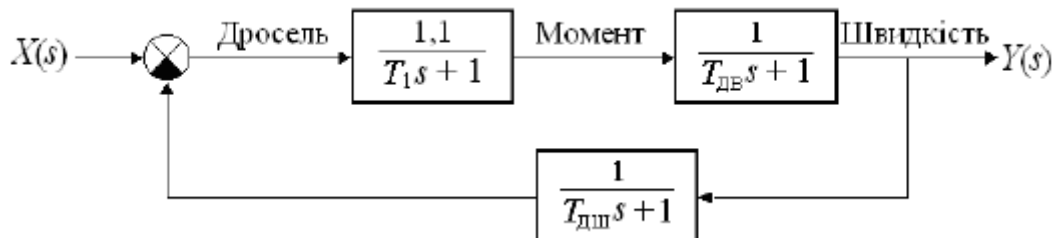


Рисунок 2.8 - Система керування числом обертів двигуна внутрішнього згоряння

Визначимо, чи є задана система стійкою.

```
>> W1=tf(1.1,[1 1]);
>> Wdv=tf(1,[3 1]);%Двигун
>> Wds=tf(1,[0.4 1]);%Датчик швидкості
>> Wp=series(W1,Wdv);
>> W=feedback(Wp,Wds)
```

Transfer function:

$$0.44 s + 1.1$$

$$1.2 s^3 + 4.6 s^2 + 4.4 s + 2.1$$

Тепер знайдемо корені характеристичного полінома. Для цього у командному рядку набираємо команду:

```
>> pole(W)

ans =

-2.7227
-0.5553 + 0.5782i
-0.5553 - 0.5782i
```

Як бачимо, всі корені лежать ліворуч від мнімої вісі комплексної площини, тобто система є стійкою.

2.14 Аналіз якості роботи системи

Проаналізуйте якість роботи системи приведеної на рис. 2.9.

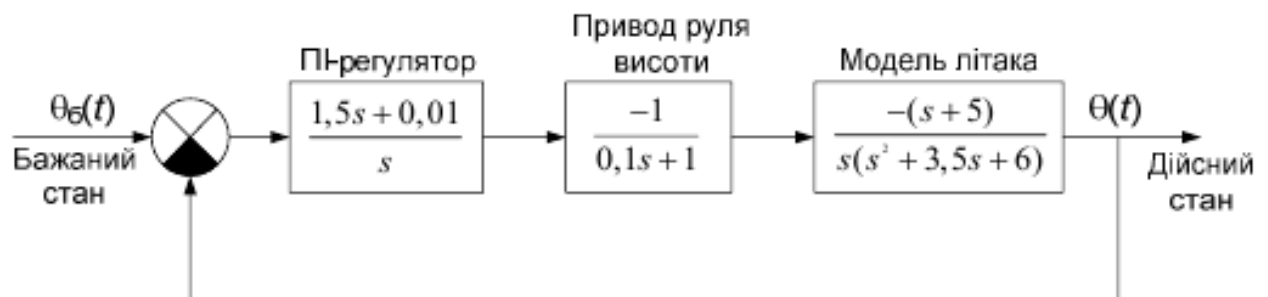


Рисунок 2.9 - Структурна схема системи керування літака з автопілотом

Стійкість - головна, але не єдина вимога до системи керування. Стійку систему оцінюють додатково, користуючись спеціальними показниками якості.

Якість системи керування звичайно характеризується її реакцією на вхідний сигнал заданого виду. Але оскільки вхідні сигнали, які можуть реально діяти на систему, заздалегідь не відомі, то про її якість судять по реакції на типовий вхідний сигнал.

Розглянемо автопілот, призначений для автоматичного утримання літака на заданому курсі та висоті (рис. 2.10).

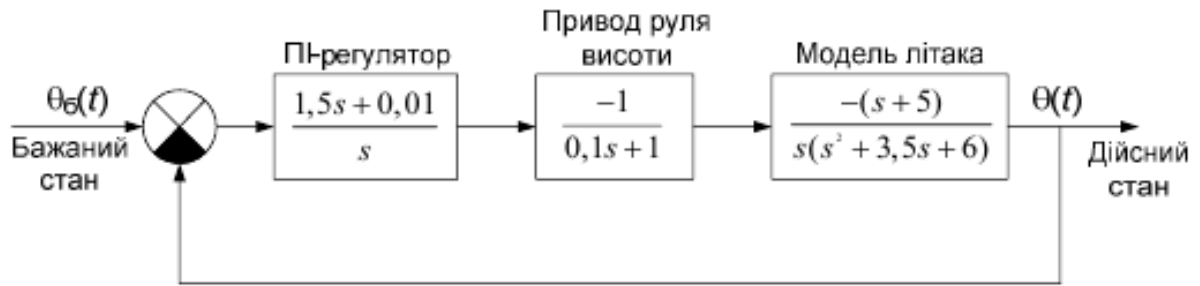


Рисунок 2.10 - Структурна схема системи керування літака з автопілотом

З допомогою функцій **step** та **impulse** можна побудувати реакцію системи на найпоширеніші типи сигналів - одиничний східчастий сигнал і одиничний імпульс.

Проаналізуємо якість роботи системи, приведеної на рис., за допомогою вказаних функцій. Відповідний скрипт наведений нижче та характеристики, побудовані з його допомогою.

```
W1=tf([1.5 0.01],[1 0]);%ПІ-регулятор
Wpr=tf(-1,[0.1 1]);%Привод руля висоти
Ws=tf([-1 -5],[1 3.5 6 0]);%Модель літака
Wraz=W1*Wpr*Ws;%Передаточна функція розімкнутої САК
W=feedback(Wraz,1);%Передаточна функція замкнутої САК
step(W)
ylabel('h(t)')
figure(2)
impulse(W)
ylabel('\itw(t)'), grid
```

Викликавши контекстне меню і поставивши в підменю **Characteristics** прапорці напроти відповідних показників якості, можна одержати наочне уявлення про якість системи. Якщо підвести курсор миші до якої-небудь характерної точки, то на екрані відображається числове значення відповідного показника якості.

Отримане вікно можна зафіксувати щикликом миші і потім переміщати в довільному напрямку або редагувати за допомогою контекстного меню.

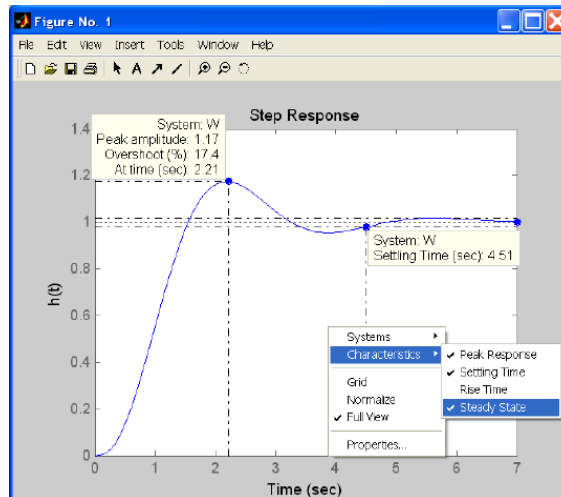


Рисунок 2.11 - Визначення показників якості за перехідною функцією

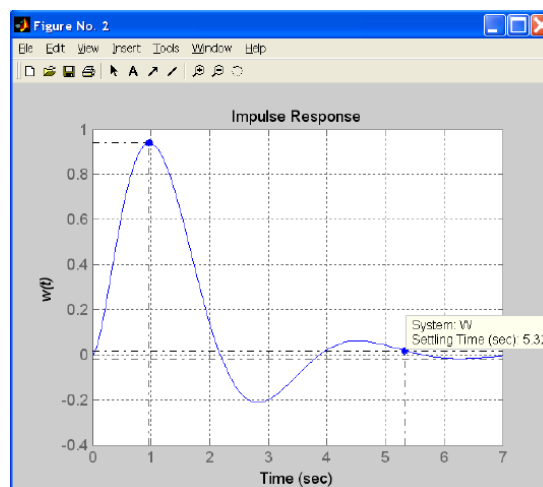


Рисунок 2.12 - Визначення показників якості за імпульсною перехідною функцією.

2.15 Аналіз найпростішого елемента структурної схеми – підсилювача та його блока Gain в SIMULINK

Проаналізуйте найпростіший елемент структурної схеми – підсилювач та його блок **Gain** в SIMULINK.

Найпростішим елементом структурної схеми є підсилювач. Вихідна величина цієї ланки прямо пропорційна вхідній величині, тому його рівняння має такий вигляд:

$$y(t) = k \cdot x(t).$$

Коефіцієнт **k** зветься коефіцієнтом підсилення ланки. Передаточна функція підсилювальної ланки збігається з коефіцієнтом підсилення ланки:

$$W(s) = k.$$

В Simulink підсилювач представляється блоком **Gain** з бібліотеки Math Operations. На рис. 2.13 наведене графічне зображення блока Gain.

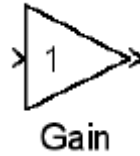


Рисунок 2.13 - Блок Gain

Прикладом підсилювальної ланки є важільна система, показана на рис. 2.14.

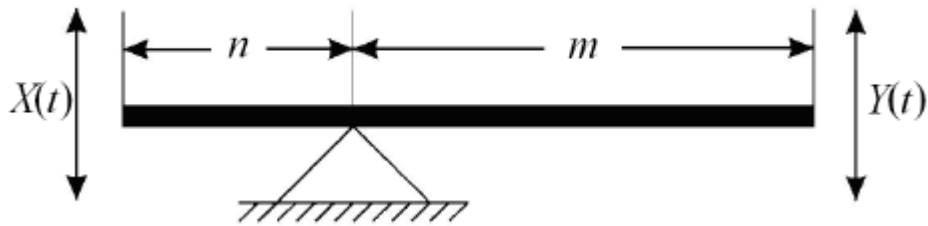


Рисунок 2.14 - Важільна система.

Величини $x(t)$ і $y(t)$ зв'язані співвідношенням:

$$y(t) = \frac{m}{n} \cdot x(t) = k \cdot x(t).$$

Іншим прикладом може служити чотирьохполосник, показаний на рис. 2.15.

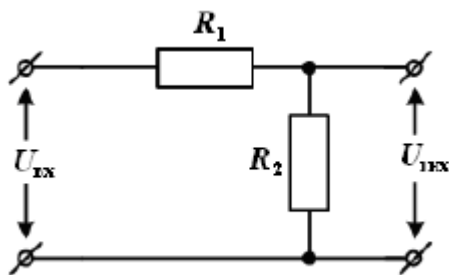


Рисунок 2.15 - Чотирьохполосник

Напруги $U_{\text{вх}}$ і $U_{\text{вих}}$ зв'язані співвідношенням:

$$y(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} x(t) = k \cdot x(t).$$

Рівняннями такого типу описується і закон Гука:

$$F = kx,$$

де F - прикладена сила, x - переміщення кінця пружини, k - жорсткість пружини. Таким чином, пружину також можна описати моделлю у вигляді блока **Gain**.

Розглянуті приклади ще раз ілюструють той факт, що процеси зовсім різної фізичної природи можуть моделюватися однаковими за структурою рівняннями, тобто ілюструють універсальність методів математичного моделювання.

Вікно параметрів блока Gain наведене на рис. 2.16.

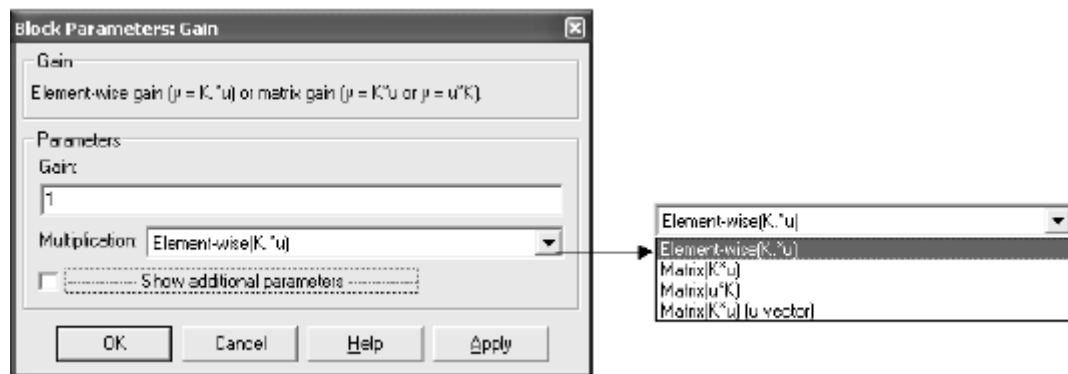


Рисунок 2.16 - Вікно параметрів блоку Gain

У цьому вікні можна встановити наступні параметри блока.

Gain – введення значення коефіцієнта підсилення, що може бути скаляром (як дійсним, так і комплексним), вектором або матрицею.

Multiplication – у цьому полі вибирається зі списку спосіб виконання операції підсилення:

- **Element-wise $K*u$** (поелементний) – кожен елемент входу помножується на кожен елемент, заданий у полі Gain.
- **Matrix $K*u$** (матричний) – здійснюється матричне множення матриці коефіцієнтів підсилення на матрицю входу (матриця входу є другим співмножником).
- **Matrix $u*K$** (матричний) - множення матриці входу на матрицю підсилення (матриця підсилення є другим співмножником).
- **Matrix($K*u$)(u vector)** – кожен елемент вектора підсилення помножується на відповідний елемент входу u . У цьому випадку вихідна величина також є вектором, довжина якого повинна збігатися з довжиною вектора входу.
- **Show additional parameters** (Показати додаткові параметри) - при встановленому прапорці можна вибрати тип даних, з яким буде працювати

підсилювач або зробити масштабування підсилювача.

2.16 Аналіз елемента структурної схеми – суматора та його блока Sum в SIMULINK

Проаналізуйте елемент структурної схеми – суматор та його блок Sum в SIMULINK.

Як правило, сучасна система керування має складну структуру. При цьому часто необхідно мати можливість складати кілька вхідних сигналів. Це може знадобитися, наприклад, для враховування впливу на систему зовнішніх збурень, для синтезу паралельних коригувальних пристроїв, та й будь-яка система немислима без зворотного зв'язку. Організовувати подібні структури допомагає блок Sum з бібліотеки Math Operations. Блок Sum служить для знаходження алгебраїчної суми двох або більше вхідних змінних, кожній з яких привласнюється знак операції додавання «+» або віднімання «-». Так, для блока Sum, показаного на рис. 2.17, справедливе вираження

$$x = u - y.$$

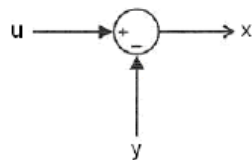


Рисунок 2.17 - Блок Sum

Блок Sum повинен мати, принаймні, один вхідний та один вихідний порти. Вікно його властивостей наведено на рис.2.18.

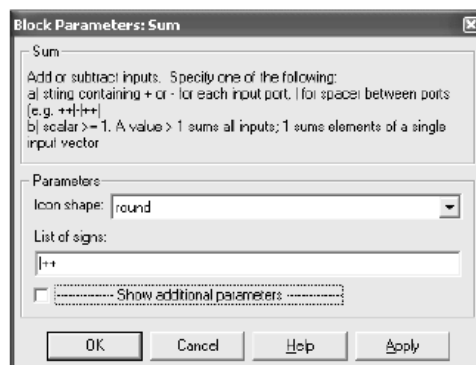


Рисунок 2.18 - Вікно параметрів блока Sum

У цьому вікні можна вказати наступні параметри блока.

Icon shape - цей список, що розкривається, дозволяє вибрати форму блока: - **round** – округність, - **rectangular** – прямокутник.

List of sign – у цьому полі задається список знаків, які визначають кількість входів і задають арифметичні дії над відповідними вхідними сигналами блока. У списку можна використати наступні знаки: + (плюс), - (мінус) і | (роздільник знаків, його положення в списку визначає, який вхідний порт блока буде закритий).

Кількість входів можна також задати константою. У цьому випадку всі входи будуть підсумовуючими. Якщо у якості списку знаків указати цифру 1 (один вхід), то блок можна використати для визначення суми елементів вектора. При цьому усередині піктограми блока з'явиться знак Σ (рис.2.19).

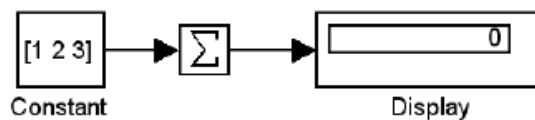


Рисунок 2.19

2.17 Аналіз елемента структурної схеми – диференційної ланки та її блока **Derivative** в SIMULINK

Проаналізуйте елемент структурної схеми – диференційну ланку та її блок **Derivative** в SIMULINK.

Блок **Derivative** (рис. 2.20)

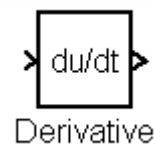


Рисунок 2.20 - Блок Derivative

робить обчислення похідної вхідного сигналу за часом відповідно до рівняння

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt}.$$

Таким чином, блок Derivative моделює ідеальну ланку, що диференціює, з передаточною функцією $W(s) = s$. Прикладом такої ланки є тахогенератор, якщо його вхідним сигналом вважати кут φ повороту вала, вихідним – напруга U , а інерційністю тахогенератора можна зневажити:

$$U(t) = k \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt},$$

де k - коефіцієнт передачі тахогенератора.

У якості ланки, що диференціює, можна розглядати механічну систему, представлену на рис. 2.21.

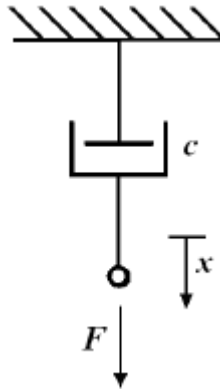


Рисунок 2.21 - Механічна система, що диференціює

2.18 Аналіз елемента структурної схеми – інтегруючої ланки та її блока **Integrator** в SIMULINK

Проаналізуйте елемент структурної схеми – інтегруючу ланку та її блок **Integrator** в SIMULINK.

Рівняння, що зв'язує вихідний і вхідний сигнали блока має вигляд:

$$y(t) = \int_{t_0}^t x(t)dt + y_0,$$

де $x(t)$ – вхідний сигнал, $y(t)$ – вихідний сигнал, y_0 – початкові умови.

У середині піктограми блока зображена передаточна функція інтегруючої ланки $1/s$ (рис.2.22), що моделюється рівнянням при нульових початкових умовах, тобто при $y_0 = 0$.

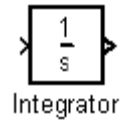


Рисунок 2.22 - Піктограма блока Integrator

Прикладами реальних елементів, еквівалентні схеми яких зводяться до інтегруючої ланки, є електронний інтегратор, безінерційний двигун постійного струму, якщо вхідна величина – напруга на якорі, а вихідна – кут повороту вала, а також конденсатор (рис. 2.23),

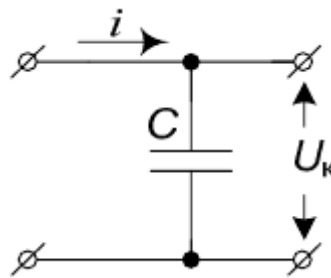


Рисунок 2.23 - Інтегруюче електричне коло

вхідною змінною якого є струм i через ємність, а вихідна змінна – напруга U_k між обкладинками конденсатора.

2.19 Аналіз елемента структурної схеми – передаточної функції та її блока Transfer Fcn в SIMULINK

Проаналізуйте елемент структурної схеми – передаточна функція та її блок **Transfer Fcn** в SIMULINK.

При побудові структури лінійної системи керування однією з найпоширеніших форм опису ланок блоків є передаточна функція. В Simulink передаточна функція ланки моделюється блоком Transfer Fcn з бібліотеки Continuous (рис.2 .24).

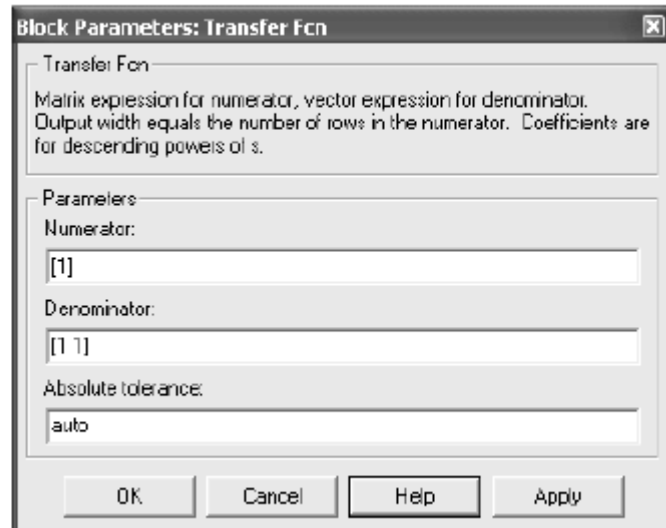
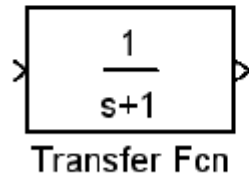


Рисунок 2.24 - Зовнішній вигляд і вікно параметрів блока Transfer Fcn

Блок Transfer Fcn задає передаточну функцію у вигляді відношення поліномів:

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{\mathbf{B}(s)}{\mathbf{A}(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0},$$

2.20 Аналіз елемента структурної схеми – ланки запізнювання та її блока Transport Delay в SIMULINK

Проаналізуйте елемент структурної схеми – ланку запізнювання та її блок Transport Delay в SIMULINK.

Цей блок забезпечує затримку вихідного сигналу відносно вхідного сигналу на заданий час. Блок Transport Delay моделює ланку запізнювання. Ця ланка описується наступним рівнянням руху

$$y(t) = x(t - \tau),$$

і передаточною функцією

$$W(s) = e^{-s\tau},$$

де τ - час запізнювання вихідного сигналу відносно вхідного.

Прикладами ланок запізнювання є конвеєрні лінії та транспортери, система регулювання товщини сталевого листа при прокаті, акустичні та інші лінії зв'язку, якщо зневажати втратою сигналу, лінії затримки на LC – колах тощо.

2.21 Дослідження роботи блоків **Derivative**, **Integrator**, **Transport Delay**, **Variable Transport Delay** в SIMULINK

Дослідіть в SIMULINK роботу блоків **Derivative**, **Integrator**, **Transport Delay**, **Variable Transport Delay**

Практично всі блоки, необхідні для створення лінійних безперервних систем знаходяться в розділі Continuous бібліотеки SIMULINK, виключення складають блоки Sum, Product, Gain, які знаходяться в бібліотеці Math Operations. Для дослідження їх роботи створимо блок-схему (рис.2.25),

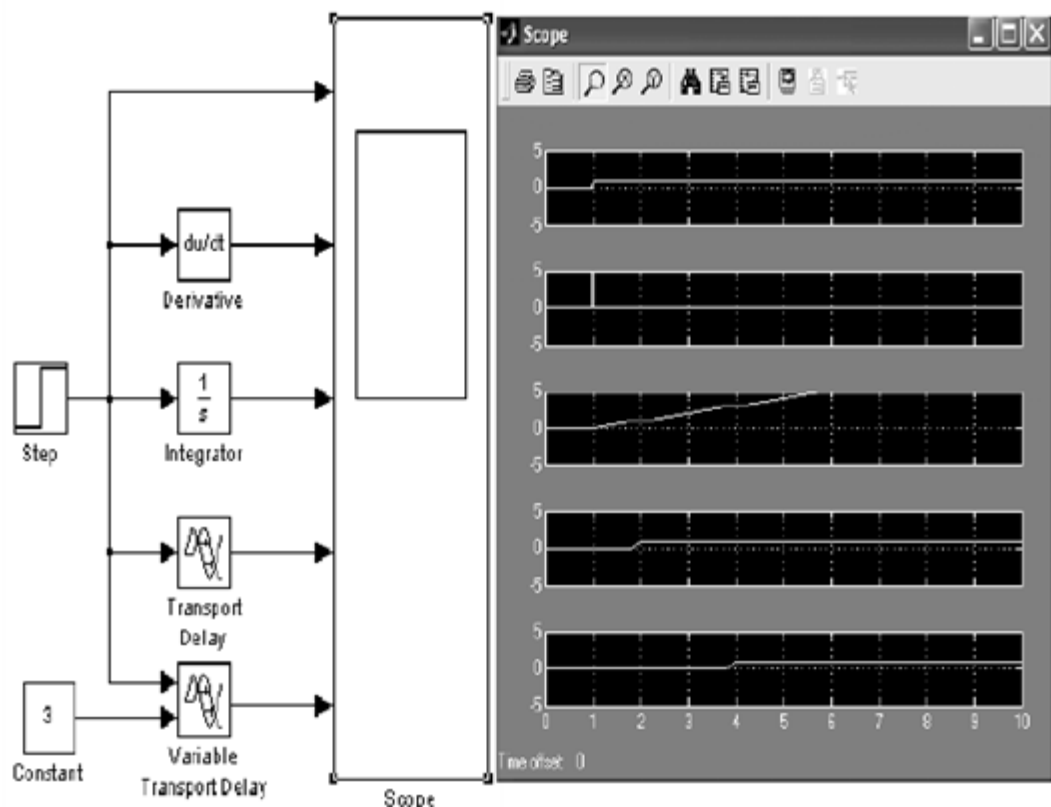


Рисунок 2.25 - Дослідження блоків розділу Continuous

замінімо параметр в блоці Constant з 1 на 3, збережемо отриману модель під ім'ям «prakt21» та запустимо. Результати моделювання приведені в правій частині рис. Видно, що блок Derivative виконує операцію ви числення похідної вхідного сигналу (викид в момент перепаду вхідного сигналу), блок Integrator – інтегрування вхідного сигналу

(лінійно зростаючий сигнал), а блоки Transport Delay та Variable Transport Delay – затримку вхідного сигналу на постійну та змінну величину часу.

2.22 Створення системи автоматичного регулювання

Створіть систему автоматичного регулювання (автопілот). Система повинна підтримувати задану висоту польоту літака (1000 м) при дії факторів, що спричиняють випадкові коливання висоти в межах 10 м.

Розглянемо роботу автопілоту. Система повинна підтримувати задану висоту польоту літака при дії факторів, які призводять до випадкових коливань висоти. Для створення блок-схеми перетягнемо в нове вікно редактора блоки Constant, Uniform Random Number, Transfer Fcn, Sum, Scope, Gain, Mux. Список параметрів, які необхідно замінити, приведено в табл. 2.1. Час моделювання встановіть рівним 3600 с, збережіть блок-схему під ім'ям «prakt22» та запустіть на моделювання. Якщо все виконано правильно, результат буде аналогічним приведеному на рис. 2.26. Сигнал з великим розмахом – траєкторія руху літака без автопілота, сигнал з меншим розмахом - траєкторія руху в разі роботи системи автоматичного регулювання.

Таблиця 2.1 - Параметри блоків

Блок	Параметр	Новое значение
Constant, Constant1, Constant2	Constant value	1000
Transfer Fcn, Transfer Fcn1	Denominator	[100 0]
Uniform Random Number и Uniform Random Number1	MinimumMaximum	-1010
Sum	List of signs	+-
Gain	Gain	5

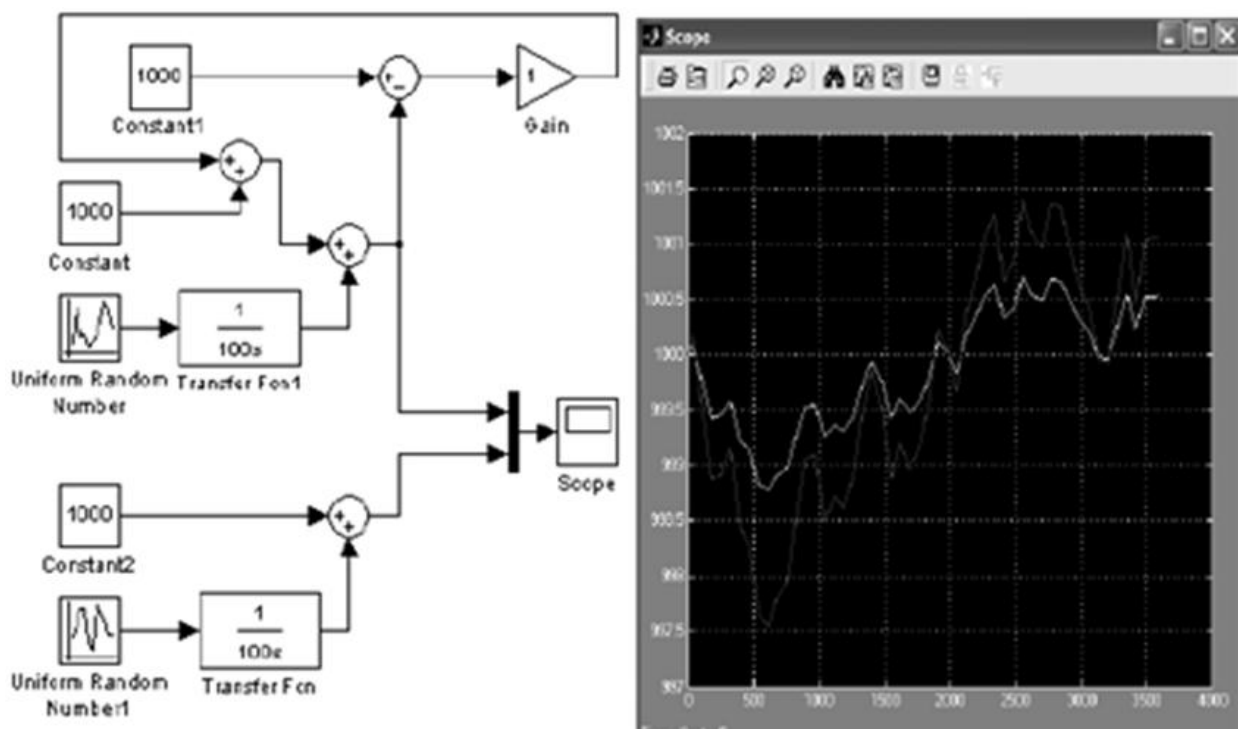


Рисунок 2.26 - Модель системи автоматичного керування

Література

1. Акулов С.А., Федотов А.А. Основы теории биотехнических систем. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 259 с.
2. Гурко О.Г., Єрьоменко І.Ф. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник / О.Г. Гурко, І.Ф. Єрьоменко. – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.