

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Методичні матеріали для вчителів v.1.0

Вступ

Енергетика відіграє фундаментальну роль у нашому сучасному суспільстві. З розвитком технологій і збільшенням числа користувачів усіх цих технологій світові потреби в енергії, за оцінками фахівців, постійно зростатимуть. Якщо продовжити нарощування виробництва електроенергії сучасними темпами, то зрештою попит перевищить пропозицію. Отже, ця серія уроків має на меті дати розуміння можливого майбутнього рішення енергетичної проблеми: керованого термоядерного синтезу.

Ця серія уроків почалася модулем 1 «Основи синтезу», мета якого надати учням необхідні основи для роботи та розуміння решти модулів. **До модуля 3 «Керування параметрами плазми» слід братися після опанування змісту модуля 1.**

Цю серію уроків призначено для передвищої освіти: європейський рівень ISCED 3-4.

Як користуватися модулями

Хрестоматія для учнів містить різноманітні матеріали для уроків: інформація, що розташована в яскравих кольорових рамках осторонь від основного тексту надає додаткові пояснення до основних тем. Вона не є обов'язковою для використання в класі.

Завдання, що розташовані у світлих рамках, можна виконувати як вправи в класі. Їх можна використовувати під час уроку як для подальшого обговорення, так і для перевірки того, як школярі розуміють матеріал.

Окремо до модуля підготовлено також додаткові вправи. Ці вправи мають шкалу від * до ***, у якій символ * відповідає початковому рівню, а *** відповідає більш складним завданням.

Кожен модуль складається з таких частин:

- Хрестоматія для учнів
 - Включно з вправами для роботи в класі
- Додаткові вправи
- Презентація PowerPoint
 - Включно з вправами для роботи в класі
- Методичні поради для вчителів
 - Включно з такими додатками
 - Таблиця констант і коефіцієнтів перерахунку
 - Відповіді до вправ для роботи в класі
 - Відповіді на додаткові вправи

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Зміст методичних порад для вчителів

Вступ	1
Як користуватися модулями	1
Розділ 1: Навчальні цілі	3
Розділ 2: Предмети та уроки, які є близькими за змістом	3
Розділ 3: Теми Модуля 3	3
Розділ 4: Короткий огляд модуля 3	4
Розділ 5: Основні схеми уроків	5
15-хвилинний урок для середніх учнів	5
15-хвилинний урок для успішних учнів	6
Урок тривалістю одна година для середніх учнів	7
Урок тривалістю одна година для успішних учнів	8
Розділ 6: Використання презентації PowerPoint та інших матеріалів	10
Розділ 7: Посилання для подальшого вивчення та розваг для модуля 3	10
Додаток А: Таблиця констант	12
Додаток Б: Розв'язки до аудиторних вправ	13
Додаток В: Розв'язки до додаткових вправ	14
Додаток Г: Джерела	17

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Розділ 1: Навчальні цілі

По закінченню цього модуля школярі повинні:

- Знати назви різних параметрів плазми
- Розуміти принципи роботи простого контуру керування
- Розуміти необхідність наявності зворотного зв'язку та сигналу про помилку в контурі керування
- Пояснити три різні методи нагрівання (плазми)
- Розуміти, як фізики проводять вимірювання та керують гарячою плазмою
- Розуміти термінологію в галузі діагностики плазми
- Розуміти принцип діагностики плазми на основі електронно-циклотронного випромінювання
- Пояснити, що таке електромагнітна хвиля

Розділ 2: Предмети та уроки, які є близькими за змістом

Окрім понять, які обговорюються в модулі 1, тісно пов'язаними є такі теми:

- Методи нагрівання
- Автоматизовані системи

Розділ 3: Теми Модуля 3

У кожному розділі розкрито відповідні фізичні теми. Цей матеріал можна використовувати для адаптації плану уроку відповідно до знань учнів і відведеного часу на уроці.

1. Вступ до керування
 - Автоматизовані системи
 - Схеми керування
 - Опорні значення
 - Датчики
 - Виконавчі механізми
 - Регулятори
 - Зворотній зв'язок
 - Сигнали про помилки
2. Нагрівання плазми
 - Нагрівання електромагнітними хвилями
 - Електромагнітні хвилі
 - Частоти
 - Довжини хвиль
 - Взаємодія хвиля-частинка
 - Магнітне поле
 - Циклотронне обертання
 - Циклотронна частота
 - Інжекція нейтральних частинок
 - Кінетична енергія
 - Швидкості

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

- Омичне нагрівання
 - Електрика
 - Потужність
 - Струм
 - Температура
 - Опір
 - Провідники
- 3. Вимірювання (діагностика) температури плазми
 - Методи вимірювання
 - Активні
 - Пасивні
 - Глобальні
 - Локальні
 - Вимірювальні матеріали
 - Калібрування
- 4. Висновки та матеріали для подальшого опрацювання
 - Інші параметри

Розділ 4: Короткий огляд модуля 3

У першому розділі буде представлено вступ до керування та контурів керування. Будуть описані такі поняття як опорні значення, датчики, принципи вимірювання, виконавчі механізми та регулятори в контурах керування, а також важливість і принцип роботи зворотного зв'язку та сигналу про помилки. Ці знання про базовий контур керування будуть застосовані до керування в синтезі.

У другому розділі буде описано три методи нагрівання плазми: електромагнітні хвилі, інжекція нейтральних частинок і омичне нагрівання. Для усвідомлення механізму нагрівання хвилями необхідно розуміти фізику електромагнітних хвиль і механізми взаємодії хвиля-частинка. Знання з модуля 1 про електричні та магнітні поля будуть використані для розуміння поняття циклотронної частоти, яке є необхідним для двох методів нагрівання плазми: нагрівання на електронному циклотронному резонансі та нагрівання на іонному циклотронному резонансі. Частина, яку присвячено інжекції нейтральних частинок, зосереджена на зв'язку між температурою, кінетичною енергією та швидкістю. В газі не всі частинки мають однакову швидкість, тому поняття середньої швидкості є доволі важливим для плазми. Щоб отримати в плазмі більше частинок з високою швидкістю, використовують інжекцію пучка нейтральних частинок. У цьому методі найбільш важливим етапом є нейтралізація частинок. Останній метод нагрівання – це омичне нагрівання, де важливим є співвідношення між температурою та питомим опором. Основною темою цієї частини є електрика.

Третій розділ починається з термінології, яку використовують для опису методів діагностики в термоядерній плазмі. Термін «діагностика» матиме велике значення, оскільки він описує концепцію вимірювань, а також власне методи та інтерпретацію. В діагностиці розрізняють локальні та глобальні вимірювання. Обидва вимірювання є важливими для синтезу. Останню частину цього розділу присвячено активній локальній діагностиці температури, заснованій на електронно-циклотронному випромінюванні (ЕЦВ).

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Четвертий розділ містить короткий підсумок і висновки до модуля. В ньому наголошено, що температура є не єдиним важливим параметром плазми, що є ще багато інших. Також згадано труднощі вимірювання залежності параметрів плазми від часу.

Розділ 5: Основні схеми уроків

Як і в першому модулі, у цьому для безпосереднього використання запропоновано дві основні схеми уроків: коротке заняття (15 хвилин) і більш тривале заняття (1 година). В цьому модулі запропоновано різні уроки для навчання середніх і успішних учнів.

Мета цих схем уроків — дати уявлення про урок і зменшити час на підготовку для вчителя. Схеми можна адаптувати до власного плану уроку. Для обох схем уроків діяльність учнів, підготовка та ідеї роботи в класі є однаковими.

Діяльність учнів включає слухання, обговорення, постановку завдань і роботу над вправами.

Підготовка до уроків включає:

- Завантаження презентації PowerPoint
- Надання учням хрестоматії та додаткових вправ

15-хвилинний урок для середніх учнів

Метою цього 15-хвилинного уроку є ознайомлення з керуванням та контуром керування. Будуть розглянуті важливі діагностичні терміни термоядерного синтезу та надано коротке пояснення пасивної та активної діагностики.

Для цього уроку необхідними є такі матеріали:

- Хрестоматія для учнів
- Презентація PowerPoint

Протягом такого уроку учні мають ознайомитися з різними схемами контурів керування, усвідомити їх важливість і зрозуміти, як часто застосовують ці контури.

Тривалість	Діяльність учителя	Матеріали	Діяльність учнів
3 хвилини	Вступ до теми	Розділ 1: Слайди 1 - 3 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
3 хвилини	Обговорити з учнями аудиторну задачу 3.1 а) і b) та дати учням можливість самостійно накреслити відповідь на завдання c)	Розділ 1: Слайди 4 і 5 презентації PowerPoint	Працювати самостійно над аудиторною задачею, а потім взяти участь у обговоренні з однокласниками
2 хвилини	Викласти матеріали розділу 1: що таке	Розділ 1: Слайди 6 і 7 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

	регулятор і як його застосовують у діагностиці плазми		
3 хвилини	Викласти матеріали розділу 2: методи нагрівання	Розділ 1: Слайд 8 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
3 хвилини	Викласти матеріали розділу 3: вимірювання температури плазми	Розділ 1: Слайди 14 і 15 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
1 хвилина	Обговорити аудиторну задачу 3.3	Розділ 1: Слайди 16 і 17 презентації PowerPoint	Працювати в парах над аудиторною задачею. Слухати, ставити питання та брати участь в обговоренні
			Виконати додаткову вправу 3.1

15-хвилинний урок для успішних учнів

Мета цього 15-хвилинного уроку для більш сильних учнів полягає в тому, щоби ознайомити учнів із принципами керування параметрами плазми, принципами роботи контуру керування та діагностикою. Основну увагу буде зосереджено на різних аспектах роботи контуру керування та загальних діагностичних термінах: пасивна, активна, локальна та глобальна. Після цього уроку учні можуть намалювати власний контур керування та пояснити діагностичну термінологію, надану вище.

Для цього уроку необхідними є такі матеріали:

- Хрестоматія для учнів
- Презентація PowerPoint

Протягом такого уроку учні мають ознайомитися з різними схемами контурів керування і вміти після уроку пояснити принципи роботи та застосування цих контурів керування.

Тривалість	Діяльність учителя	Матеріали	Діяльність учнів
2 хвилини	Вступ до теми	Розділ 1: Слайди 1 - 3 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
2 хвилини	Викласти матеріали розділу 1: що таке регулятор і як його застосовують у діагностиці плазми	Розділ 1: Слайди 6 і 7 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
2 хвилини	Викласти матеріали розділу 2: методи нагрівання	Розділ 2: Слайд 8 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

2 хвилини	Обговорити аудиторну вправу 3.2	Розділ 2: Слайди 9 і 10 презентації PowerPoint	Брати участь в обговоренні
3 хвилини	Викласти матеріали розділу 2: методи нагрівання, короткий вступ (без деталей)	Розділ 2: Слайди 11 - 13 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
3 хвилини	Викласти матеріали розділу 3: вимірювання температури плазми	Розділ 3: Слайди 14, 15 і 18 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
			Домашнє завдання: - Додаткова вправа 3.5 - Аудиторна вправа 3.1

Урок тривалістю одна година для середніх учнів

Мета цього уроку тривалістю одна година полягає в тому, аби ознайомити учнів із принципами керування параметрами плазми та принципом роботи контуру керування. Будуть розглянуті важливі терміни діагностики термоядерної плазми та надано коротке пояснення принципів пасивної та активної діагностики. Будуть проведені практичні заняття на розуміння та застосування контурів керування та циклотронного обертання.

Для цього уроку необхідними є такі матеріали:

- Хрестоматія для учнів
- Презентація PowerPoint
- Додаткові вправи

Тривалість	Діяльність учителя	Матеріали	Діяльність учнів
3 хвилини	Вступ до теми	Розділ 1: Слайди 1 – 3 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
3 хвилини	Обговорити аудиторну вправу 3.1 а) і б) та дати можливість учням самостійно накреслити відповідь до завдання с)	Розділ 1: Слайди 4 і 5 презентації PowerPoint	Самостійно виконати аудиторну вправу, взяти участь у обговоренні
2 хвилини	Викласти матеріали розділу 1: що таке регулятор і як його застосовують у	Розділ 1: Слайди 6 і 7 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

	діагностиці плазми		
5 хвилини	Перевірити, що зрозуміли учні	Додаткові вправи	Виконати додаткову вправу 3.1
3 хвилини	Викласти матеріали розділу 2: методи нагрівання	Розділ 2: Слайд 8 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
3 хвилини	Обговорити аудиторну вправу 3.2	Розділ 2: Слайди 9 і 10 презентації PowerPoint	Взяти участь у обговоренні
15 хвилини	Викласти матеріали розділу 2: методи нагрівання	Розділ 2: Слайди 11 - 13 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
5 хвилини	Допомогти застосувати формулу циклотронної частоти	Додаткові вправи	Виконати додаткову вправу 3.3 а)
5 хвилини	Викласти матеріали розділу 3: вимірювання температури плазми	Розділ 3: Слайди 14 і 15 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
3 хвилини	Обговорити аудиторну вправу 3.3	Розділ 3: Слайди 16 і 17 презентації PowerPoint	Працювати в парах над аудиторною вправою. Слухати, ставити питання та брати участь у обговоренні
13 хвилини	Викласти матеріали розділу 3 та зробити висновки	Розділ 3: Слайди 18 - 21 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання

Урок тривалістю одна година для успішних учнів

Мета цього уроку тривалістю одна година для сильних учнів полягає в тому, аби ознайомити їх із принципами керування параметрами плазми, принципом роботи контуру керування та методами діагностики, а також надати їм можливість застосувати здобуті знання при виконанні завдань. Після цього уроку студенти можуть скласти власний контур керування, пояснити принципи роботи застосованої діагностики та виконати додаткові вправи.

Для цього уроку необхідними є такі матеріали:

- Хрестоматія для учнів
- Презентація PowerPoint
- Додаткові вправи
- Доступ до інтернету (лаптоп, смартфон, планшет)

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Тривалість	Діяльність учителя	Матеріали	Діяльність учнів
2 хвилини	Вступ до теми	Розділ 1: Слайди 1 - 3 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
5 хвилин	Обговорити аудиторну вправу 3.1	Розділ 1: Слайди 4 і 5 презентації PowerPoint	Працювати самостійно над аудиторною вправою, тоді взяти участь у обговоренні
2 хвилини	Викласти матеріали розділу 1: що таке регулятор і як його застосовують у діагностиці плазми	Розділ 1: Слайди 6 і 7 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
10 хвилин	Виконати додаткову вправу 3.2. Поділити завдання між учнями (три групи: А, В і С), допомогти з дослідженням. Дозволити учням обмінюватися здобутою інформацією	Додаткові вправи Доступ до інтернету	Дослідження! Дайте відповідь на поставлене запитання
2 хвилини	Викласти матеріали розділу 2: методи нагрівання	Розділ 2: Слайд 8 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
2 хвилини	Обговорювати аудиторну вправу 3.2	Розділ 2: Слайди 9 і 10 презентації PowerPoint	Взяти участь у дискусії
10 хвилин	Викласти матеріали розділу 2: методи нагрівання	Розділ 2: Слайди 11 - 13 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
10-15 хвилин	Виконати додаткову вправу 3.4 та організувати обговорення в класі	Додаткові вправи	Працювати в парах над завданнями
3 хвилини	Викласти матеріали розділу 3: вимірювання температури плазми	Розділ 3: Слайди 14 і 15 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання
3 хвилини	Обговорити аудиторну вправу 3.3, аби швидко	Розділ 3: Слайди 16 і 17 презентації PowerPoint	Узяти участь у обговоренні

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

	з'ясувати розуміння матеріалу учнями		
10 хвилин	Викласти матеріали розділу 3: глобальні та локальні методи вимірювання температури, висновки	Розділ 3: Слайди 18 - 21 презентації PowerPoint	Слухати, ставити питання

Розділ 6: Використання презентації PowerPoint та інших матеріалів

На сайті є презентації PowerPoint (для кожного модуля).

<https://fusenet.eu/education/material>.

Презентація PowerPoint містить модуль у цілому, включно з аудиторними вправами та відповідями. Її можна використовувати безпосередньо в класі. Якщо є належне відео Phet на YouTube за темою, посилання буде вказано в примітках до відповідного слайда. Огляд додаткового матеріалу надано у розділі 7. Презентацію PowerPoint можна адаптувати до тем, які розглядають у класі.

Щоби підготувати учнів до тих чи інших тем модуля 3, можна дати їм підготовчу вправу як домашнє завдання до цієї теми. Це може бути одна або декілька * вправ із числа додаткових. Для підготовки також можна використовувати деякі теми, які вказано в «посиланнях для подальшого вивчення та розваг» (див. розділ 7).

Розділ 7: Посилання для подальшого вивчення та розваг для модуля 3

Вчителям

Нижче наведено загальну довідкову інформацію до цього модуля (англійською мовою) для вчителів. В основному, цю інформацію призначено для розширення власних знань і розуміння предмету вчителями. Цю інформацію можна використовувати і в класі, але тоді її слід адаптувати відповідно до рівня учнів.

Деякі сайти містять інформацію про теми, які розглядаються або пов'язані з цим модулем. Під кожною URL-адресою є короткий опис того, що там можна знайти.

- a. FuseNet website - <https://www.fusenet.eu/education/material> Тут можна знайти інші чотири модулі. Крім того, є також теоретичні статті, курси та експерименти з тем, пов'язаних із цією серією уроків.

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Для вчителів і учнів

Наприкінці модуля можна знайти додатковий матеріал для опрацювання. Матеріал цього розділу можна використовувати як додаткове пояснення для учнів на уроці. Деякі URL-адреси дають більш глибокий погляд на різні теми або надають приклад експерименту. Після кожної URL-адреси надано інформацію про вміст і можливе використання.

Розділ 1:

- Matlab – принципи роботи PID регулятора, частина 1, Що таке PID регулятор?
<https://www.youtube.com/watch?v=wkfEZmsQqiA> тривалість 11:41 хвилин
Поглиблене пояснення принципів роботи PID регулятора. Рекомендовано для сильних учнів.
- Horizon 4 електроніка – демонстрація PID
<https://www.youtube.com/watch?v=qKy98Cbcltw> тривалість 1:29 хвилин
Коротка демонстрація роботи PID регулятора

Розділ 2:

- Фізика – це просто – Що таке електромагнітні хвилі?
<https://www.youtube.com/watch?v=hk63uUhkZH4> тривалість 3:40 хвилин
Пояснення природи електромагнітної хвилі з точки зору електротехніки. Електромагнітні хвилі пов'язані з магнітними та електричними полями, які згадуються в модулі 1.
- Cognito – GCSE Physics – Електромагнітні хвилі #64
<https://www.youtube.com/watch?v=7v2gs8rdQzU> тривалість 4:51 хвилин
Описано електромагнітний спектр та електромагнітні хвилі. Надано переважно базову інформацію про частоти, довжини хвилі, спектри.
- Лекції з фізики – експеримент з подвійною щільною Доктора Квантума
<https://www.youtube.com/watch?v=NvzSLByrw4Q> тривалість 5:41 хвилин
Описано взаємодію хвиля-частинка: як хвиля також може поводитися як частинка. Можна використовувати як додаткову інформацію в галузі хвиль і частинок.

Розділ 3:

- Енергетика токамака – швидший спосіб термоядерного синтезу – інжекція нейтрального пучка та його важливість для токамаків
<https://www.youtube.com/watch?v=Hc1jcsp8Zs> тривалість: 4:07 хвилин
Представлено інжекцію нейтральних частинок у контексті токамака. Показано обладнання, яке є необхідним для інжекції нейтралів.

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Додаток А: Таблиця констант

Фізична величина	Одиниця вимірювання	Перевідний коефіцієнт до системи SI
Енергія ¹	1 калорія	4.184 Дж
Енергія ³	1 тне*	$4.2 * 10^{10}$ Дж
Енергія ¹	1 кВт·год*	$3.6 * 10^6$ Дж
Маса ¹	1 т	$1.0 * 10^3$ кг
Маса ¹	1 а.о.м.	$1.66 * 10^{-27}$ кг
Температура ¹	0 °C	273.15 К
Тиск ¹	1 бар	$1.0 * 10^5$ Па

Таблиця А.1 перевідні коефіцієнти

Фізична величина	
Температура ядра Сонця ²	$1.571 * 10^7$ К
Температура поверхні Сонця ¹	5780 К
(середня) густина Сонця ²	1408 кг/м^3
Густина ядра Сонця ²	$1.622 * 10^5 \text{ кг/м}^3$
Тиск в ядрі Сонця ²	$2.477 * 10^{11}$ бар
Температура поверхні Землі ¹	295 К
(середня) густина Землі ²	5514 кг/м^3
Маса електрона ¹	$9.109 * 10^{-31}$ кг
Заряд електрона ¹	$1.602 * 10^{-19}$ Кл
Маса протона ¹	$1.673 * 10^{-27}$ кг
Заряд протона ¹	$1.602 * 10^{-19}$ Кл
Маса нейтрона ¹	$1.675 * 10^{-27}$ кг

Таблиця А.2 константи

¹ Noordhoff uitgevers & NVON (2021). *Binas HAVO/VWO Informatieboek 6de editie (6e havo/vwo)* (01 ed.). Groningen, Nederland: Noordhoff Uitgevers.

² Sun Fact Sheet. (2018). Retrieved 13 July 2021, from <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>

³ IEA Unit converter and glossary, for common energy units. From <https://www.iea.org/reports/unit-converter-and-glossary>

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Додаток Б: Розв'язки до аудиторних вправ

Аудиторна вправа 3.1

- a. Визначте (1) регулятор, (2) датчик і (3) виконавчий механізм для підтримання температури в холодильнику.

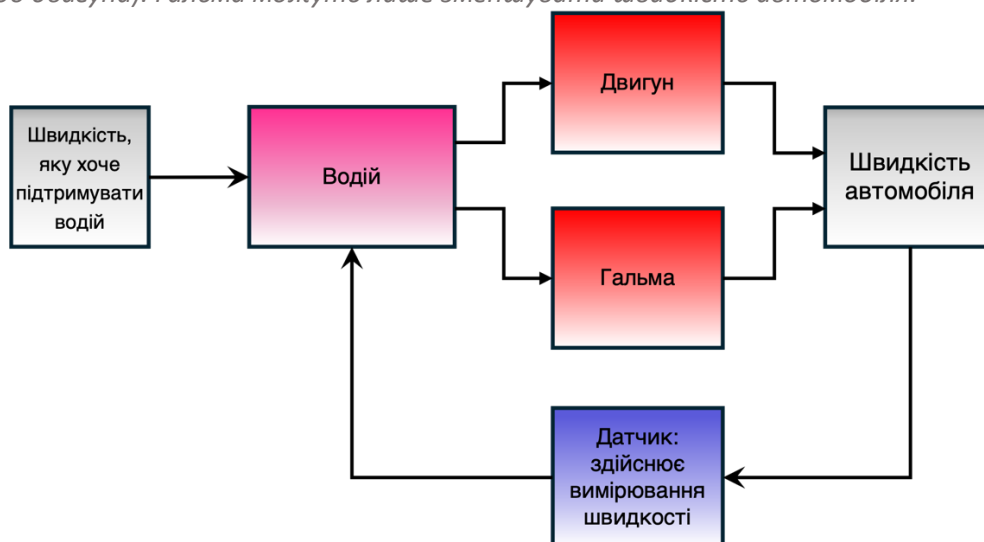
(1) мікроконтроллер, (2) датчик температури, (3) система охолодження.

- b. Тепер виконайте те саме для системи підтримання швидкості автомобіля.

(1) водій, (2) датчик швидкості, (3) двигун і гальма.

- c. Нарешті, намалуйте контур регулювання швидкості автомобіля, як це було зроблено для домашньої температури кімнати на рисунку 3.1.

Рисунок наведено нижче. Зверніть увагу, що тут є два приводи: двигун і гальма. Двигун може як збільшувати, так і зменшувати швидкість автомобіля (подаючи більше або менше палива до двигуна). Гальма можуть лише зменшувати швидкість автомобіля.



Аудиторна вправа 3.2

У двох наших способах розігрівання ми згадали суп як приклад. Є, звичайно, ще один спосіб розігріти суп: налити його в каструлю та розігріти над плитою. Тепло плити передається до каструлі, а потім до супу. Чи можемо ми так само використати цей метод для нагрівання термоядерної плазми?

Коротко кажучи: ні. Температура, яку ми хочемо мати для термоядерної плазми, є набагато вищою, ніж температура, яку ми хотіли б мати у супі. Це породжує дві проблеми: у нас недостатньо нагріта плита, і всі наявні у нас сковорідки розтануть за такої високої температури. Металом з найвищою температурою плавлення є вольфрам, який плавиться при температурі близько 3400 °С, що набагато нижче температури нашої термоядерної плазми! Таким чином, кондуктивне нагрівання не можна застосовувати для термоядерної плазми. Модуль 4 обговорює й інші проблеми, пов'язані з «каструлею» навколо плазми.

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Аудиторна вправа 3.3

Чи є наведені нижче діагностики прикладами активної або пасивної діагностики?

- a. Вимірювання температури приміщення ртутним термометром.

Пасивна

Ртутний термометр показує температуру за рахунок природного розширення ртуті. Немає жодної потреби в додаткових пристроях, які б спричиняли це розширення.

- b. Вимірювання швидкості автомобіля шляхом застосування інфрачервоного лазера під час проїзду автомобіля та обчислення швидкості за спостережуваним доплеровим зсувом.

Активна

Лазер слід навести на автомобіль штучно; його не дано від природи. Нам потрібно використовувати інший пристрій для цієї діагностики (а саме лазерний пістолет).

- c. Вимірювання швидкості автомобіля шляхом закріплення невеликого магніту на колесі і підрахунку числа проходів магніту протягом хвилини. Швидкість розраховують на основі цього числа та відомого радіусу колеса.

Пасивна

Попри те, що задіяно додатковий пристрій (магніт), нам не потрібно керувати цим пристроєм: магнітне поле магніту існує від природи. Ситуація змінилася б, якби було використано електромагніт, який є магнітним лише тоді, коли протікає струм.

Додаток В: Розв'язки до додаткових вправ

Вправа А.1

- a. Фізична величина, опорне значення, регулятор, виконавчий механізм і датчик.
- b. Зворотний зв'язок використовують для надання регулятору інформації про фізичну величину в режимі реального часу. Цю інформацію надає датчик. На основі зворотного зв'язку та опорного сигналу регулятор може створити сигнал про помилку. Цей сигнал використовують для формування команди виконавчому механізму. Зворотний зв'язок є важливим для керування.

Вправа А.2

У **пропорційному (П) регуляторі**, сигнал помилки множать на фіксовану константу (зазвичай її позначають як k_p). Таким чином, сигнал на виході регулятора є прямо пропорційним сигналу помилки, а виконавчий механізм, що використовується в цьому випадку, є більш досконалим, ніж у випадку простого регулятора увімкнення-вимкнення. Якщо наявне постійне опорне значення (в Інтернеті часто представлене «ступінчастою функцією»), сигнал на виході регулятора коливається навколо опорного значення, що є небажаним. Головною вадою П-регулятора є **стаціонарна похибка**, яку він вносить. Це означає, що опорне значення ніколи не досягається через постійно присутню похибку. Наприклад, літак зі стаціонарною похибкою висоти ніколи не летить на заданій висоті, а продовжує летіти дещо нижче неї.

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

У **пропорційно-інтегральному (ПІ) регуляторі**, сигнал похибки не лише обробляється, як у П-регуляторі, похибка також накопичується з часом. Невелика стаціонарна похибка накопичується, створюючи помітний сигнал похибки, за допомогою якого виконавчий механізм має можливість усунути стаціонарну похибку. Таким чином, використання ПІ-регулятора усуває стаціонарну помилку. Завдяки своїй накопичувальній природі, інтегральна частина регулятора, як кажуть, враховує "минуле" сигналу похибки.

У **пропорційно-інтегрально-диференціальному (ПІД) регуляторі**, сигнал похибки не тільки обробляється, як у ПІ-регуляторі, – його похідну використовують для прогнозування поведінки сигналу похибки (чи вона зростає/зменшується?). Прогнозуючи поведінку сигналу похибки, опорного значення можна досягти набагато швидше, ніж у ПІ-регуляторі. Завдяки наявності передбачення диференціальна частина регулятора немовби розглядає «майбутнє» сигналу похибки. ПІД-регулятори часто зустрічаються в промислових застосуваннях і є великою темою досліджень у теорії керування.

Вправа А.3

Відповіді обчислюють за допомогою формули та наданих значень. Зауважимо, що циклотронна частота електрона є додатним числом, оскільки використовують абсолютну величину q .

- d. $f_{gyro,electron} = 140$ ГГц. ($q = -e, m = m_e$)
- e. $f_{gyro,deuterium} = 38.1$ МГц. ($q = e, m = 2m_p$)
- f. $f_{gyro,tritium} = 25.4$ МГц. ($q = e, m = 3m_p$)

Вправа А.4

Відповіді обчислюють за допомогою формули та наведених значень. Зверніть увагу, наскільки великими є швидкості частинок плазми порівняно зі швидкістю атома водню за кімнатної температури.

- a. $v = 2.50 \times 10^3$ м/с. ($T = 298\text{K}, m = m_p$)
- b. $v = 1.36 \times 10^6$ м/с. ($T = 175 \times 10^6$ К, $m = 2m_p$)
- c. $v = 1.11 \times 10^6$ м/с. ($T = 175 \times 10^6$ К, $m = 3m_p$)
- d. $v = 82.2 \times 10^6$ м/с. ($T = 175 \times 10^6$ К, $m = m_e$)

Використовуючи значення швидкості, яке розраховане в пункті А.4d, отримуємо

e. $\gamma = 1.04$.

Це може здатися невеликим значенням. Проте воно є достатньо великим, аби зробити релятивістські ефекти у термоядерній плазмі важливими в окремих випадках.

Вправа А.5

Починають із виразу:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = E_{ionization}$$

який переписують для λ . Енергія іонізації дорівнює 13.6 eV або 2.18×10^{-18} Дж. В такий спосіб остаточно отримують довжину хвилі 91.2 нм.

Зауважте, що ця довжина хвилі забезпечує *мінімальну* енергію, яка є необхідною для фотоіонізації. Можна також застосовувати фотони з більшою енергією, тобто з коротшою довжиною хвилі. Отже, розрахована довжина хвилі є *максимальною* довжиною хвилі, яку можна використовувати в джерелах нейтралів.

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Вправа А.6

При використанні цієї термінології важливо розуміти наступні відмінності:

- a. *Дублювальну* діагностику використовують у тому самому діапазоні значень параметра плазми. *Доповнювальну* діагностику використовують у різних діапазонах значень параметра плазми.
- b. *Активна* діагностика потребує введення «чогось» (електромагнітних хвиль або нейтральних частинок) у плазму. Для *пасивної* діагностики цього не потрібно, оскільки проводять вимірювання якогось «природного» явища в плазмі.
- c. *Глобальне* вимірювання містить інформацію про плазму в цілому. Простим прикладом є середнє або максимальне значення деякої фізичної величини (наприклад, температури) у термоядерному реакторі. *Локальні* вимірювання проводять у певних точках об'єму термоядерного реактора.

Модуль 3 – Керування параметрами плазми

Навчальні матеріали для середньої школи від FuseNet

Додаток Г: Джерела

Інші параметри плазми

H.-J. Hartfuss, and T. Geist. (2013). "Fusion Plasma Diagnostics with mm-Waves". Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA: Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany.

This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

