

## ДОДАТОК А Графічна частина кваліфікаційної роботи

## Харківський національний університет радіоелектроніки

### Кафедра АПОТ Кваліфікаційна робота магістра

### Моделювання компонентів керування МЕМС зі зворотними зв'язками з використанням Matlab / Simulink

Магістранта групи СКСм-17-1  
Колосова Артема  
Андрійовича

Керівник:  
проф. каф. АПОТ  
Литвинова Є.І.



Харківський національний університет радіоелектроніки,  
кафедра АПОТ, тел. 7021 326, e-mail [d\\_ad@nure.ua](mailto:d_ad@nure.ua)

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## МЕТА і ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою кваліфікаційної роботи є розробка процедур моделювання МЕМС-компонентів в системах регулювання зі зворотними зв'язками з використанням математичного пакету Matlab Simulink

### Завдання дослідження :

- v аналіз класифікації систем автоматичного регулювання з ПІД-регуляторами;
- v аналіз загальної структури мікросистеми зі зворотними зв'язками;
- v розробка моделі системи регулювання теплових параметрів;
- v побудова та моделювання моделі системи регулювання теплових параметрів в середовищі Matlab Simulink;
- v проведення експерименту в Matlab Simulink по підбору коефіцієнтів ПІ-регулятора в системі регулювання температури.



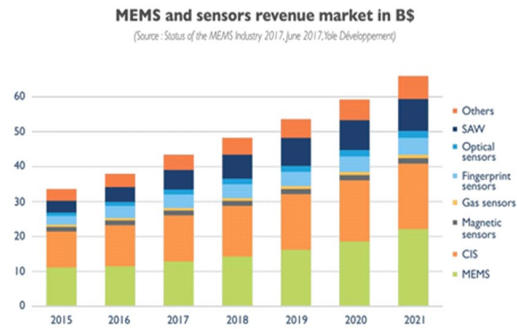
Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Динаміка зростання ринку MEMC та сенсорів

Відповідно до дослідження французької консалтингової організації Yole Développement ринок MEMC та сенсорів буде зростати з 48 млрд \$ у 2018р. до 66 млрд \$ у 2021р.

У міру зростання популярності концепції IoT потреба у пристроях MEMC буде все більше зростати. Кількість MEMC сенсорів та актюаторів (включаючи фільтри, генератори, мікродзеркала та мікрорідинні пристрої) до 2021 року буде збільшуватись до майже 138 млрд. од.



За оцінками експертів очікується, що витрати на виробництво групи ринку MEMS та сенсорів для автомобільної промисловості, таких як сенсори тиску, системи контролю тиску в шинах (TPMS), інерційні, магнітні, ультразвукові сенсори, сенсори зображень, RADAR і LiDAR до 2022 року досягнуть 23 млрд \$.



Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

3

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Класифікація систем автоматичного управління

У процесі управління завжди присутні три складові: суб'єкт управління або структура управління об'єктом, в залежності від розв'язуваної задачі, сам об'єкт управління і середовище.

Сукупність об'єкта управління і пристрою управління, взаємодія яких призводить до поставленої мети управління, називається системою управління. Системи управління поділяються на розімкнуті та замкнуті.

У розімкнутій системі управління для отримання бажаної реакції об'єкта зазвичай використовується регулятор або виконавчий пристрій, В розімкнутій системі зворотний зв'язок відсутній.

В замкнутій системі проводиться вимірювання дійсного значення вихідного сигналу, яке потім порівнюється з його бажаним значенням. Виміряне значення виходу називають сигналом зворотного зв'язку.

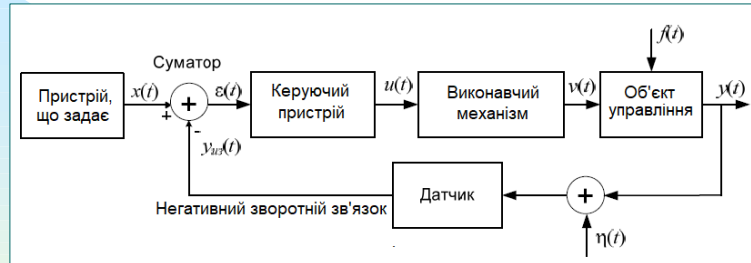


Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

4

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Системи автоматичного управління зі зворотними зв'язками



У замкнутій системі автоматичного управління проводиться вимірювання вихідної змінної і її результат у вигляді сигналу зворотного зв'язку порівнюється з еталонним вхідним сигналом, що несе інформацію про заданому значенні вихідної змінної.

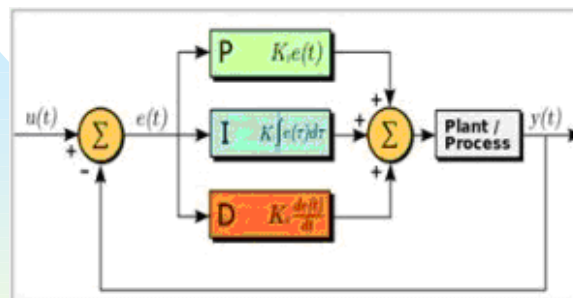


Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

5

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Пропорційно-інтегрально-диференціальне (ПІД) регулювання



$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

де  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d > 0$  – пропорційний, інтегральний і диференціальний коефіцієнт ПІД-регулятора, відповідно.

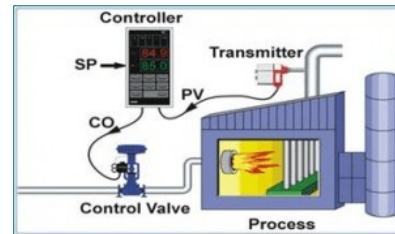
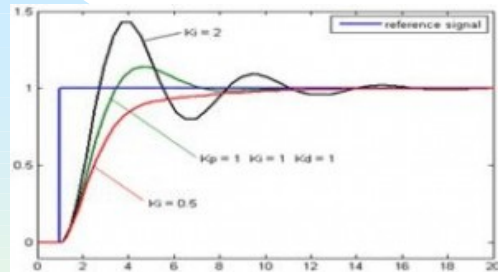


Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

6

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Застосування ПІД-регуляторів



Сигнал зворотного зв'язку від технологічної установки порівнюється з вхідним сигналом  $u(t)$ , і відповідний сигнал помилки  $e(t)$  подається на алгоритм ПІД-регулювання. Згідно пропорційним, інтегральним і диференціальних розрахунками в алгоритмі, контролер виробляє комбінований відповідь або керований вихід, який застосовується до пристроїв управління установкою.



Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

7

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Температурні ПІД-регулятори

Температурний контролер з ПІД-регулятором формує сигнал зворотного зв'язку для виконавчого обладнання на основі інформації, що надходить від підключеного датчика температури. Сигнал управління складається з трьох величин: пропорційної, що інтегрує і диференціює, що розраховуються на підставі вхідного сигналу.

1. Пропорційна величина показує відхилення поточної величини контрольованої температури від заданого значення уставки. Чим більше відхилення, тим більше вихідний сигнал.
2. Інтегральна величина визначає інтеграл зміни відхилення значень за часом.
3. Дифференціююча величина показує швидкість зміни відхилення.

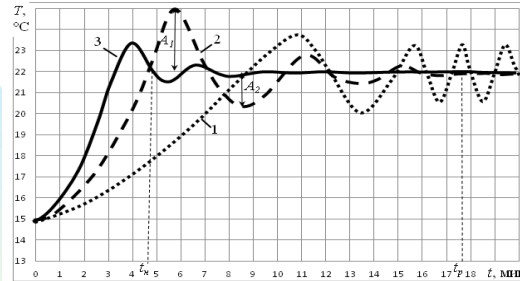


Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

8

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Налаштування температурного ПІД-регулятора



Налаштування ПІД-регулятора зводяться до наступного: збільшення пропорційного коефіцієнта збільшує швидкодію і знижує запас стійкості; зі зменшенням інтегральної складової помилка регулювання з плином часу зменшується швидше; зменшення постійної інтегрування зменшує запас стійкості; збільшення диференціальної складової збільшує запас стійкості і швидкодію.



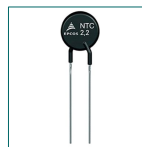
Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

9

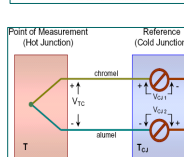
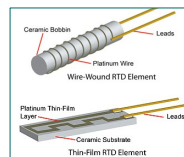
Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Температурні МЕМС-сенсори

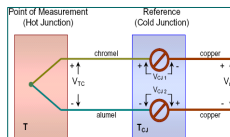
Термистори



Резистивний датчик температури



Термопары

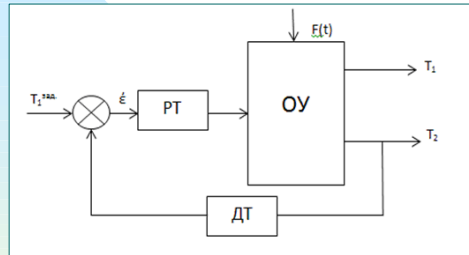


Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

10

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Модель системи автоматичного регулювання температури



Система регулювання температури містить компоненти: РТ – регулятор температури; ДТ – датчик температури, ОУ – об'єкт управління. В структурі сигнал  $F(t)$  – вплив, що збуджує (температура зовнішнього середовища),  $T_1$  – вплив, що задається,  $\epsilon$  – статична помилка.

Принцип дії системи автоматичного регулювання температури полягає в тому, щоб при виявленні відхилення температури в приміщенні від заданого рівня змінювати встановлене значення температури води в контурі опалення. Структурна модель системи складається з одного контуру, проте на виході контролюються 2 параметри:  $T_1$ -температура в приміщенні,  $T_2$ -температура в контурі опалення.



Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

11

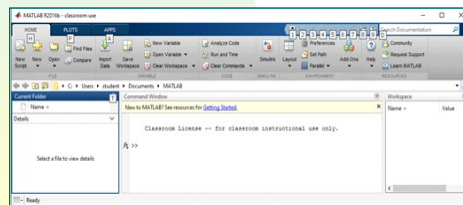
Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Matlab Simulink для моделювання систем регулювання

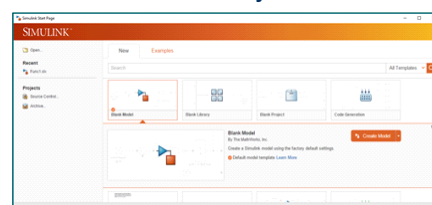
Система імітаційного моделювання Simulink є компонентом інтегрованого середовища інженерних розрахунків Matlab компанії The MathWorks. Simulink.

Пакет **Matlab Simulink** дозволяє здійснювати дослідження (моделювання у часі) поведінки динамічних систем і характеризується простотою і наочністю використання при моделюванні різних пристроїв і систем. У Simulink використовується **візуально-орієнтований підхід**, коли готові блоки за допомогою миші переносяться з бібліотеки в вікно документа Simulink і з'єднують лініями входи і виходи цих блоків. В результаті отримуємо Simulink-модель проекту, яка запускається натисканням кнопки Run.

Головне вікно системи Matlab Simulink



Simulink Library Browser



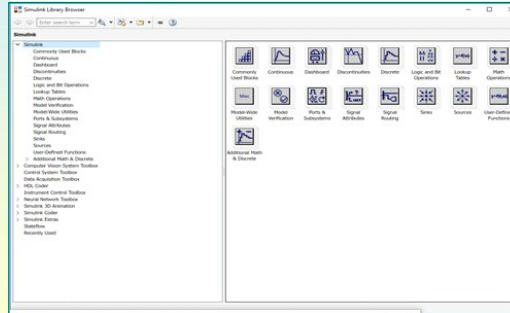
Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

12

## Вікно браузера бібліотеки Simulink

**Вікно браузера** містить наступні елементи:

- ✓ заголовок, з назвою вікна - Simulink Library Browser;
- ✓ панель інструментів, з ярликами найбільш часто використовуваних команд;
- ✓ вікно коментаря для виведення повідомлення про обраний блок;
- ✓ список розділів бібліотеки, реалізований у вигляді дерева;
- ✓ вікно вмісту розділу бібліотеки (список вкладених розділів бібліотеки або блоків).

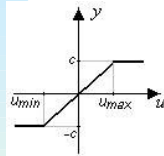


Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

13

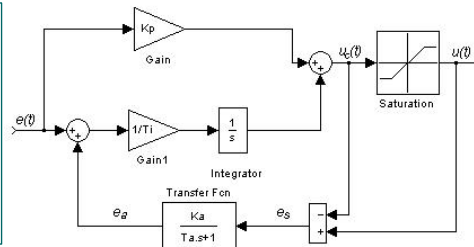
## Системи автоматичного управління з регуляторами обмеження

Статична характеристика нелінійного елемента типу «насування»



$$\bar{u} = \begin{cases} u_{\min}, & \text{при } u < u_{\min} \\ u, & \text{при } u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ u_{\max}, & \text{при } u > u_{\max} \end{cases}$$

Запропоновано Simulink-моделі, з регуляторами обмеження та використанням зворотного зв'язку, які можуть бути використані в системах регулювання температурним режимом у приміщенні



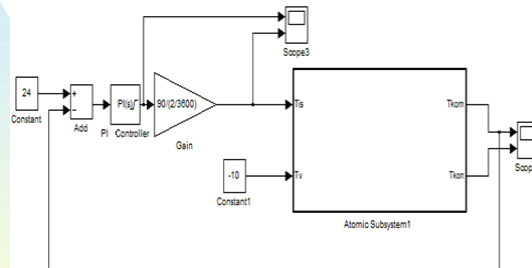
Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

14

Магістрант Колосов Артем СКСМ-17-1

## Simulink-модель системи регулювання температурним режимом у приміщенні

В Simulink-моделі у блоках Constant і Constant1 задані температурні параметри. У блоку Constant встановлена температура повітря приміщення 24 °С, що відповідає температурі повітря в приміщенні



Для системи регулювання температурним режимом було визначено оптимальні налаштування ПІ-регулятора для лінійної САР.



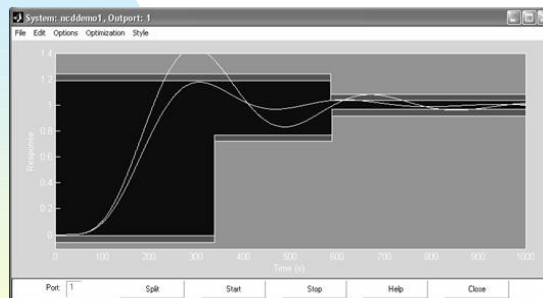
Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

15

Магістрант Колосов Артем СКСМ-17-1

## Результати поведінкового моделювання. 1

**Електромеханічна** система регулювання температури з ПІ-регулятором, як видно з графіків, генерує загасаючий коливальний відгук на навколо встановленої температури



$$\sigma = \frac{t_{Bmax} - t_{Bуст}}{t_{Bуст}} \cdot 100\%$$

$$\sigma = \frac{30 - 24}{30} \cdot 100\% = 20\%$$

Перехідний процес в системі регулювання температури



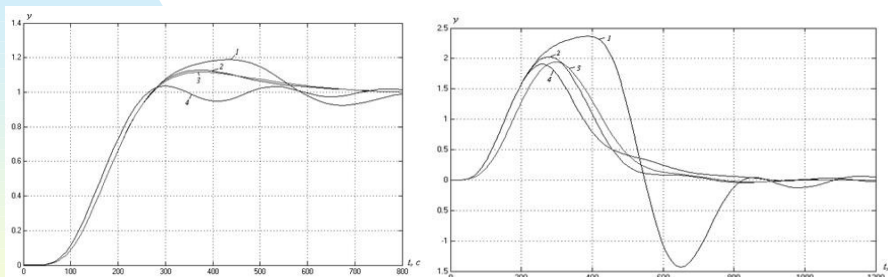
Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

16

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Результати поведінкового моделювання. 2

**Електромеханічна** система регулювання температури з ПІ-регулятором, як видно з графіків, генерує загасаючий коливальний відгук на навколо встановленої температури



Перехідний процес в системі регулювання температури



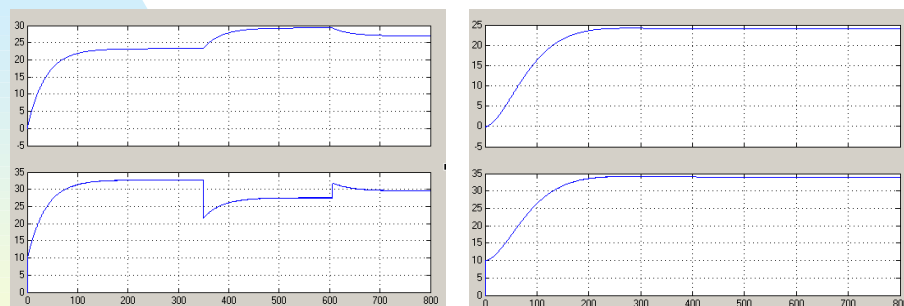
Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

17

Магістрант Колосов Артем СКСм-17-1

## Результати поведінкового моделювання. 3

**Порівняння** систем регулювання температури з відсутністю (лівий) та присутністю (правий) ПІ-регулятора



Перехідні процеси температурного режиму у приміщенні при відсутності ПІ-регулятора

Перехідні процеси регулювання температурного режиму при наявності ПІ-регулятора



Kharkov National University of Radio Electronics,  
Design Automation Department, phone 7021 326

18

## Висновки по результатам моделювання

З проведених досліджень та аналізу отриманих перехідних процесів можна зробити наступні висновки:

- v якщо регулятор не враховує насичення виконавчого механізму, то при досягненні керуючого впливу обмежень збільшується час регулювання, динамічна похибка та перерегулювання.
- v якщо в систему автоматичного регулювання ввести алгоритм обліку обмежень, то значно підвищується якість регулювання:

Використання алгоритмів компенсації інтегрального насичення мають певні переваги:

- v реалізація методу не вимагає потужних обчислювальних засобів;
- v значно покращується якість регулювання в системі.

**Перспективним є використання методів компенсації інтегрального насичення в системах автоматичного керування, що самоналаштовуються, з використанням алгоритмів адаптації та ідентифікації**



## Висновки

- v В кваліфікаційній роботі розглянуті особливості побудови розімкнутих та замкнених систем автоматичного регулювання. Для автоматичного регулювання запропоновано використовувати ПІД-регулятори. Перевагою ПІД регулятора є швидкий вихід на режим, точне утримання заданого параметра (наприклад, температури) і швидка реакція на впливи.. Розглянуті способи налаштування ПІД-регуляторів для систем регулювання температури.
- v Проаналізовані різні типи температурних МЕМС-сенсорів та їх застосування в системах автоматичного регулювання температури в розумному будинку. Складена математична модель регулювання температурним режимом в приміщенні.
- v Для моделювання системи регулювання температурних режимів у приміщеннях запропоновано використовувати систему Matlab/Simulink. Створена Simulink-модель замкнутої системи регулювання температури на основі ПІ-регулятора.
- v При проведенні поведінкового моделювання отримані графіки залежностей, що підтверджують отримані математичні моделі системи регулювання температури.

