

Система керування електричним нагрівачем за допомогою тиристорного ключа

Експлуатація електричних нагрівачів є поширеним явищем у різних галузях – від обігріву приміщень до великих об'єктів із виробництва теплової енергії. Побудова системи керування електричними нагрівачами залежить від типу напруги, закону керування та потужності нагрівача. У роботі проаналізовано переваги й недоліки різних законів регулювання для керування нагрівачами малої та великої потужності. Аналіз джерел свідчить про активне використання електричних нагрівачів у багатьох сферах для забезпечення оптимального температурного режиму – у системах обігріву, виробничих і технологічних процесах, а також для підвищення комфорту та безпеки в побуті й промисловості. Для ефективної роботи таких систем необхідне впровадження енергоефективного керування.

Статтю присвячено побудові системи керування електричним нагрівачем із використанням тиристорного ключа. Подано методичку розрахунку чисельного значення потужності, яку генерує нагрівач за один півперіод роботи тиристора. Розглянуто недоліки використання промислової мережі як джерела живлення, зокрема спотворення форми синусоїдального сигналу. Для подолання цих недоліків запропоновано здійснювати більше вимірів під час відкриття ключа з метою отримання дійсних значень напруги. Такий підхід рекомендовано застосовувати при розробці систем керування лінійними об'єктами з використанням методів прогнозування. Лінійний характер поведінки об'єкта дозволяє передбачити його реакцію на вплив нагрівального елемента протягом одного півперіоду, що забезпечує ефективне керування навіть потужним нагрівачем. Наведено результати розрахунку відносних похибок під час використання цифрового датчика температури DS18B20. У подальших дослідженнях планується впровадити отримані результати в існуючі системи керування електричними нагрівачами.

Ключові слова: тиристорний регулятор; система керування; електричний нагрівач.

Актуальність теми. У промислових процесах, де ключову роль відіграє точне керування температурними режимами, застосовуються нагрівачі на постійному та змінному струмі. Вони необхідні для забезпечення оптимальних умов у різних технологічних операціях, зокрема обробці матеріалів, таких як випалювання, нагріві для модифікації структури матеріалу, гартування та інших важливих термічних процесів.

Під час роботи з нагрівачами на постійному струмі виникають певні труднощі з генерацією енергії великої потужності, що може обмежувати їх застосування у випадках, коли потрібні значні теплові навантаження. Це створює необхідність розробки системи керування нагрівачами на змінному струмі, яка дозволить більш гнучко регулювати інтенсивність і температуру нагріву, що особливо важливо у випадках, коли необхідний точний контроль над процесом.

Вибір оптимального закону керування безпосередньо залежить від типу використовуваного нагрівача. Дискретне регулювання та поступова зміна параметрів є найпоширенішими методами, які забезпечують ефективне й точне керування температурою відповідно до вимог технологічного процесу.

При дискретному регулюванні зі ступінчастою функцією нагрівання відбувається шляхом паралельно-послідовного з'єднання нагрівачів із різною потужністю, що дозволяє регулювати температуру шляхом перемикавання між ними. Плавне регулювання передбачає керування одним нагрівачем із постійною амплітудою за рахунок зміни тривалості імпульсу. Цей метод часто реалізується з використанням широтно-імпульсної модуляції (ШИМ).

Дискретне регулювання має низку недоліків: перемикавання між ступенями може призвести до змін потужності та викликати коливання температури на об'єкті керування. Для налаштування технологічного процесу необхідно визначити оптимальні рівні потужності та моменти перемикавання між ступенями. Це потребує ретельного аналізу процесу та проведення численних експериментів для оптимізації налаштувань.

Плавне регулювання забезпечує більш м'яку та безперервну зміну температури, що є важливим аспектом у процесах, де потрібний точний і стабільний контроль теплових параметрів.

Керування з прогнозуванням є сучасним та ефективним підходом у контексті автоматизації та оптимізації процесів. Цей метод передбачає використання алгоритмів, які дозволяють системам адаптуватися до змінних умов на основі передбачення майбутніх подій. Основна ідея керування з

прогнозуванням полягає в тому, щоб не лише реагувати на поточні зміни в системі, а й активно передбачати та враховувати її майбутні стани. Це забезпечує більш гнучке й точне керування процесами, а також сприяє оптимізації використання ресурсів.

Ступінчасте керування, що передбачає стрибкоподібну зміну параметрів, створює певні труднощі при впровадженні законів прогнозування. Це зумовлено тим, що зміни в системі відбуваються дискретно і можуть ускладнювати точне передбачення й керування майбутніми станами. У випадку ступінчастого керування, коли зміни параметрів відбуваються на фіксованих рівнях, можуть виникати нелінійні ефекти, які ускладнюють точне моделювання системи. Це особливо критично в умовах, коли необхідне точне прогнозування для ефективного керування процесами, такими як технологічне виробництво або системи з високим рівнем автоматизації. Таким чином, у контексті прогнозування та точного керування більш гнучкі методи, такі як плавне регулювання, можуть забезпечити переваги в прогнозуванні та адаптації до змінних умов.

Метою статті є побудова структури та вибір ефективного методу керування нагрівачем. Цей процес охоплює вибір конфігурації системи, розробку закону керування, що забезпечує максимальну ефективність і точність у регулюванні температури. Дослідження спрямоване на синтез структури системи керування для застосування ШІМ-закону керування нагрівачем із прогнозуванням.

Аналіз попередніх досліджень. У сучасних умовах зростання вимог до енергоефективності та екологічної безпеки значно підвищується інтерес до систем електричного нагріву. Ефективне керування такими системами вимагає не лише точного регулювання температури, а й урахування специфіки об'єкта керування, споживання електроенергії та умов експлуатації. Це обумовлює необхідність розробки як програмних алгоритмів, так і апаратних засобів контролю. У зв'язку з цим у науковій літературі представлено широкий спектр підходів до моделювання та керування електронагрівачами – від класичних регуляторів до інтелектуальних систем та фізично обґрунтованих моделей. Далі наведено огляд таких підходів, що дозволяє виявити переваги, обмеження та перспективні напрями подальших досліджень.

Дослідження [1] акцентує увагу на тому, що для вирішення екологічних проблем і зменшення викидів парникових газів необхідно перевести житлову індустрію на низьковуглецеві джерела енергії з метою мінімізації цих викидів. Для досягнення енергоефективності пропонується використовувати електричні нагрівачі.

У праці [2] описано метод керування нагрівачем, у якому режим обирається відповідно до значення різниці між заданою та фактичною температурою. Розглянуто програмні методи, що пропонують процедуру для покращення роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Автори рекомендують багатокритеріальне оптимальне керування, яке враховує витрати на енергію, графіки активності та вподобання кожного орендаря щодо комфорту. У статті розглядається застосування дискретного та неперервного підходів до керування. Недоліком роботи є відсутність опису апаратної частини, зокрема методів керування потужністю нагрівача. У статті не надано інформацію про те, яким чином здійснюється контроль і регулювання енергії, що надходить до системи опалення. Відсутність цієї ключової деталі обмежує повне розуміння механізмів функціонування методу та може викликати труднощі під час його практичного впровадження в реальних умовах. Пояснення технічних аспектів керування потужністю нагрівача було б важливим доповненням для повної оцінки ефективності методу.

Метод керування на постійному струмі подано в [3]. Наведено основні вимоги до системи регулювання, які спрощують синтез системи керування. Тепловий потік подано у вигляді ступінчастої функції та є сталою величиною. Це створює труднощі в керуванні при великих потужностях нагрівача. У дослідженні [4] запропоновано метод керування нагрівачем із прогнозуванням на основі ШІМ-регулювання. Датчиком температури вимірюється температура об'єкта, далі вона порівнюється з таблицею температур, закладеною в пам'ять програми, після чого обирається подальше рішення та шляхом збільшення / зменшення опору регулюється потужність нагрівача.

Публікації [5, 6] зосереджені на методах керування кондуктивними та радіаційними нагрівачами в холодильниках. Як показник ефективності запропонованих методів зазначено, що споживання енергії нагрівачем було зведено до мінімуму, а ефективність розморожування покращено на 15 %. Проте ефективність цих методів не аналізується з погляду точності підтримання заданої температури.

Автори [7] серед ключових викликів виділяють відсутність математичних моделей, здатних адекватно описати струми в елементах імпульсного електронагрівача, що ускладнює їх оцінювання. Для верифікації запропонованої моделі було здійснено експериментальні дослідження, які підтвердили її відповідність реальним процесам.

Важливість побудови динамічних моделей для електричного нагрівача, що працює в перехідному режимі, зазначено у [8]. Побудова моделі залежності температури повітря на виході з нагрівача від прикладеної напруги та умов довкілля є актуальною в контексті побудови низки систем, зокрема сушильних камер періодичної дії. У таких системах тимчасово змінний тепловий потік необхідний для досягнення оптимальних умов роботи, мінімізації споживання енергії та підвищення якості продукції.

У цьому ж контексті у дослідженні [9] представлено підхід до моделювання електричної дуги як частини системи електродугового нагрівача. Особливу увагу приділено лінеаризації в області робочої точки з наголосом на необхідності врахування питань лінійності та діапазону застосування для кожної системи, а також можливості додаткового дослідження кількості лінійних ділянок щодо керованості й продуктивності.

У [10] представлено процес автоматизації нанесення тонких плівок, де температура відіграє ключову роль. Наведено експериментальну установку, процес виготовлення нагрівача, а також системи керування температурою для контролю температурного режиму. Як закон керування використовується двопозиційне регулювання. Для покращення отриманих результатів пропонується розглянути варіанти зміни закону керування, що може включати оптимізацію параметрів або використання ефективніших стратегій, спрямованих на підвищення ефективності та точності системи.

Викладення основного матеріалу. Замість розглянутого в [4] закону керування у цій статті запропоновано використовувати метод генерації теплового потоку шляхом регулювання напруги (струму) за допомогою тиристорного ключа. При цьому нагрівач підключається до джерела змінного струму, а подача потужності здійснюється протягом обраного періоду дискретизації. Рекомендовано застосовувати «плавне включення», при якому керування навантаженням реалізується шляхом відкриття тиристора поблизу моменту перетину напругою нульової відмітки. Це дозволяє формувати струмову характеристику з мінімальними спотвореннями. Такий підхід знижує рівень пульсацій і зменшує електромагнітні перешкоди. Крім того, щоб уникнути перевантажень тиристорів і виникнення перешкод, керування потужністю здійснюється на цілих півперіодах. Структурна схема системи регулювання об'єкта на змінному струмі представлена на рисунку 1.

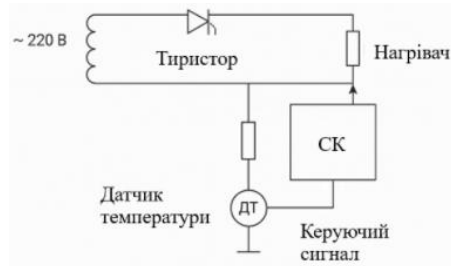


Рис. 1. Структурна схема системи регулювання об'єкта на змінному струмі

Кожен об'єкт керування має свою власну характеристичну часову сталу τ , що визначає швидкість досягнення системою сталого стану після впливу зовнішніх факторів. Нагрівачі великої потужності зазвичай мають високу теплову інерцію, що призводить до збільшеного часу встановлення температури. Ці особливості ускладнюють задачу підтримання постійної температури об'єкта.

Пропонується використання нагрівача, підключеного до джерела змінного струму. За такої умови тепловий потік формується через керування тиристором. Це дозволяє адаптувати систему керування до об'єктів з різними значеннями τ – від малих до великих. При керуванні за цілими періодами зберігається точність, однак можливі спотворення, оскільки вимірюються струм і напруга, а не сам тепловий потік.

У змінних електричних ланцюгах синусоїдального типу напруга і струм описуються рівняннями (1), (2) та графіком на рисунку 2.

$$U(t) = U_{\max} \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) . \quad (1)$$

$$I(t) = I_{\max} \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) . \quad (2)$$

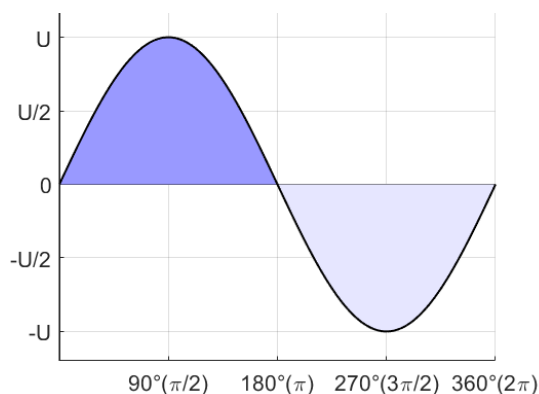


Рис. 2. Залежність напруги в синусоїдальних ланцюгах

Для аналізу впливу змінного струму або напруги за певний інтервал часу зручніше використовувати інтегральну оцінку. Вона дозволяє кількісно описати середню енергію або тепловий ефект, наприклад, за один півперіод. У формулах (3) та (4) розглядається інтеграл від синусоїди на одному півперіоді (від 0 до π/ω).

$$U = U_{\max} \int_0^{\pi/\omega} \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) dt = \frac{U_{\max}}{\omega} \int_0^{\pi/\omega} \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) d(\omega t + \varphi_0) = \frac{U_{\max}}{\omega} [-\cos(\omega \cdot t + \varphi_0)]_0^{\pi/\omega} \quad (3)$$

$$I = I_{\max} \int_0^{\pi/\omega} \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) dt = \frac{I_{\max}}{\omega} \int_0^{\pi/\omega} \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) d(\omega t + \varphi_0) = \frac{I_{\max}}{\omega} [-\cos(\omega \cdot t + \varphi_0)]_0^{\pi/\omega} \quad (4)$$

При $\varphi = 0$ та $U_{\max} = 220\sqrt{2}$ В, для напруги і при $\varphi = 0$ та $I_{\max} = \sqrt{2}$. А для струму отримуємо:

$$U = -\frac{U_{\max}}{\omega} (\cos \omega\pi - \cos 0) = -\frac{220\sqrt{2}}{\omega} (-1 - 1) = \frac{440\sqrt{2}}{\omega}; \quad (5)$$

$$I = -\frac{I_{\max}}{\omega} (\cos \omega\pi - \cos 0) = -\frac{\sqrt{2}}{\omega} (-1 - 1) = \frac{2\sqrt{2}}{\omega}. \quad (6)$$

Тепловий потік, що виділяється за один півперіод, при частоті мережі, що дорівнює 50 Гц, розраховано у виразі (7).

$$P = U \cdot I = \frac{440\sqrt{2}}{2\pi \cdot 50} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{2\pi \cdot 50} = 17,84 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}. \quad (7)$$

Слід урахувати, що характеристика струму і напруги в промисловій мережі не є ідеальною синусоїдою (рис. 3).

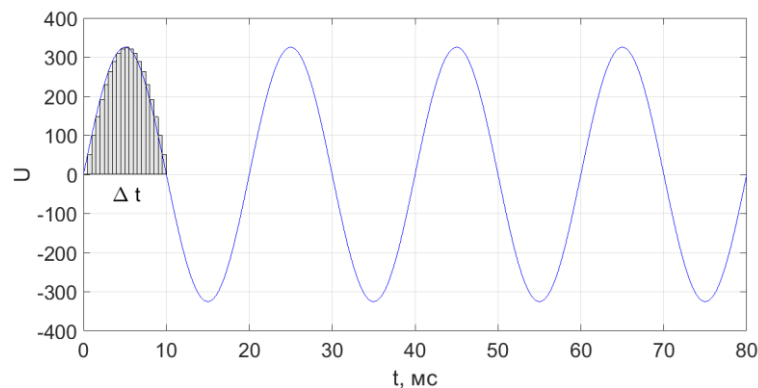


Рис. 3. Характеристика напруги в промисловій мережі

Спотворення форми сигналу відбувається через різні елементи в системі, такі як імпульсні блоки живлення, трансформатори, електродвигуни та інші пристрої, що можуть вносити нелінійні спотворення, гармоніки та шум. Це призводить до зміни форми сигналу, наприклад, синусоїдальний сигнал може перетворитися на спотворений.

Пропонується використати такий підхід: замінити синусоїду послідовністю миттєвих значень. Далі, вимірюючи струм і напругу, припускається, що вони залишаються сталими на невеликому інтервалі часу. Роботу на цьому елементарному інтервалі Δt можна обчислити за допомогою відповідної формули (8):

$$\Delta A = U(t_i) \cdot I(t_i) \cdot \Delta t \quad (8)$$

Таким чином, повна робота A_n , виконана нагрівачем за певний період часу T , визначається як сума елементарних робіт:

$$A_n = \sum_{i=1}^N U(t_i) \cdot I(t_i) \cdot \Delta t.$$

Крок дискретизації Δt обирається, щоб забезпечити необхідну точність вимірювань. Можна орієнтуватися на наявний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), його розрядність і частоту дискретизації. Було вибрано 20 вимірювань на 1 півперіод. Тоді $\Delta t = 0,0005$ с і робота з одного півперіоду дорівнює (9):

$$A = 17,84 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 8,92 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}. \quad (9)$$

Знаючи необхідну роботу A_n , постає завдання ефективного керування подачею енергії від промислової мережі. В умовах змінної синусоїдальної напруги найбільш зручним є використання імпульсного керування – вмикання нагрівача на окремі півперіоди синусоїди.

Однак для економії енергії та оптимізації роботи пристрою немає потреби вмикати нагрівач на кожному півперіоді. Натомість можна подати необхідну енергію, вмикаючи його лише на деяких з них, рівномірно розподіляючи включення по часу. Таким чином, забезпечується необхідна середня потужність без надмірних енергетичних витрат.

Для цього пропонується розрахувати середню кількість імпульсів на секунду, необхідну для виконання заданої роботи. Ця величина виражається формулою (10):

$$N = \frac{A_n}{A \cdot T}, \quad (10)$$

де N – середня кількість імпульсів на секунду (включень нагрівача);

A_n – повна робота, виконана нагрівачем за інтервал T ;

A – робота, що виконується за один півперіод при ввімкненому навантаженні;

T – тривалість усього інтервалу спостереження.

Під час проектування системи управління важливо враховувати не лише алгоритмічні та програмні аспекти, але й апаратні обмеження, що можуть суттєво вплинути на точність, надійність і швидкодію системи. До них належать:

1) часові характеристики тиристора. При управлінні навантаженнями (наприклад, обігрівачами) з використанням тиристорних ключів необхідно враховувати затримки, пов'язані з їхнім відкриттям і закриттям. Ці затримки призводять до втрат енергії та зниження точності регулювання. При виборі тиристорів важливо враховувати їхні часові параметри, наприклад, час включення та вимикання, і за необхідності використовувати більш швидкі моделі;

2) похибка датчика температури об'єкта управління. Похибка вимірювання температури залежить від роздільної здатності датчика. Наприклад, для датчика DS18B20 [11] роздільна здатність за замовчуванням становить 0,0625 °C, але може бути змінена користувачем на 0,5 °C, 0,25 °C, 0,125 °C або 0,0625 °C. Однак роздільна здатність не є похибкою. Абсолютна похибка вимірювання для DS18B20 становить до ±0,5 °C у діапазоні температур від -10 °C до +85 °C.

Відносну похибку вимірювання можна знайти за формулою:

$$\delta = \frac{\Delta x}{X} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де Δx – абсолютна похибка;

X – вимірюване значення температури.

Оскільки датчик DS18B20 вимірює температуру в діапазоні від -55 °C до +125 °C, відносна похибка вимірювань буде залежати від поточного значення температури. Таким чином, при температурі 1 °C відносна похибка може становити до 50 %, а при 80 °C – лише 0,625 %.

Лінійний характер об'єкта дозволяє отримати перехідні характеристики для побудови систем керування з прогнозуванням. На рисунку 4 представлена реакція теплового об'єкта на один півперіод роботи тиристорного ключа, який керує нагрівачем, що живиться від промислової мережі.

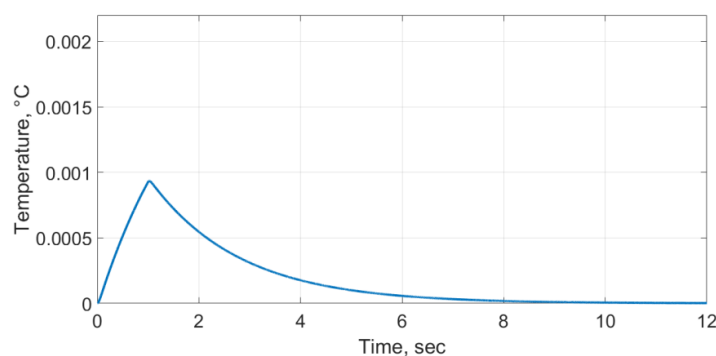


Рис. 4. Реакція теплового об'єкта на одиничний імпульс у вигляді одного півперіоду тиристора

Отримані характеристики дозволяють використовувати для керування тепловими об'єктами джерела змінного струму. Ці характеристики підтверджують лінійний характер об'єкта керування, оскільки зміна вхідних параметрів призводить до пропорційної зміни вихідних параметрів. Побудована математична модель системи дозволяє керувати нагрівачами великої потужності з високою точністю. Це дозволяє не лише контролювати процес, але й прогнозувати реакцію системи на зміни вхідних параметрів. Завдяки лінійному характеру системи, математична модель на основі отриманих характеристик дає можливість точно прогнозувати, як система буде реагувати на зміни. Наприклад, моделювання теплової інерції об'єкта

дозволяє точно визначати час, необхідний для досягнення бажаної температури після змін у вхідних параметрах. Це особливо важливо при керуванні нагрівачами великої потужності, де час реакції системи може бути значним.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Ефективне керування електричними нагрівачами є важливим, оскільки воно дозволяє оптимально регулювати температурний режим, забезпечувати енергоефективність та створювати сприятливі умови для різноманітних процесів і об'єктів. При застосуванні нагрівачів змінного струму побудова оптимальної системи керування забезпечує необхідну стабільність та точність регулювання температури теплових об'єктів, що важливо для дотримання технологічних і виробничих вимог.

Описано рівняння зміни току та напруги в промисловій мережі. Ці рівняння дозволяють розрахувати, залежно від частоти, зміну сигналу, а також дійсні значення потужності, току та напруги.

Через відмінність характеристик форми сигналу напруги промислової мережі від ідеальної синусоїди рекомендовано замінити вхідний сигнал набором дійсних значень. Для більш точного розуміння характеру зміни напруги запропоновано здійснювати вимірювання через інтервали часу, що дорівнюють Δt , при переході через нуль. Обрано цифровий датчик температури DS18B20 для вимірювання температури в діапазоні від $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це дозволяє його використання у вимірювальних процесах.

У подальших дослідженнях планується застосування запропонованого підходу для побудови системи керування температурою об'єктів, що залежить від впливу нагрівача на змінному струмі.

References:

1. Feyzioglu, A. (2023), «A Study on the Control System of Electric Water Heaters for Decarbonization», *Energies*, No. 16, pp. 1–12, doi: 10.3390/en16052439.
2. Fazenda, P., Veeramachaneni, K., Lima, P. and O'Reilly, U.-M. (2014), «Using Reinforcement Learning to Optimize Occupant Comfort and Energy Usage in HVAC Systems», *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, Vol. 1, pp. 1–16, doi: 10.3233/AIS-140288.
3. Gapon, A., Savitskiy, S. and Rudakova, N. (2011), «Mathematical model of the inertial object programmed control method», *Electric Power Engineering & Control Systems 2011*, Proc. of the 3rd Intern. conf. of young scientists (EPECS-2011), 24–26 November, Lviv Polytechnic National University, Lviv, pp. 112–115.
4. Savitskiy, S.M., Hapon, A.I., Kachanov, P.O., Yevseienko, O.M. and Vyskrebentsev, V.O. (2013), *Patent na korysnu model 81276 Ukraina, MPK G05D 23/19 (2006.01) Sposib prohramnoho upravlinnia teplovym obiektoz z zastosuvanniam shyrotoimpulsnoi modulatsii, zaivnyk NTU «KhPI» (Ukraina)*, No. u 2013 00059.
5. Yoon, Y., Jeong, H. and Lee, K.-S. (2018), «Adaptive defrost methods for improving defrosting efficiency of household refrigerator», *Energy Conversion and Management*, Vol. 157, pp. 511–516, doi: 10.1016/j.enconman.2017.12.039.
6. Zhao, R., Wang, Z., Huang, D. et al. (2023), «Electric-heater defrosting performance of frost-free refrigerator-freezer and its improvement by step-reduction power», *Applied Thermal Engineering*, Vol. 226, pp. 1–10, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120147.
7. Holovko, V., Kohanevich, V., Shikhailov, M. et al. (2022), «Unconventional Energy from an Electric Impulse Heater Combined with a Wind Turbine», *Energies*, Vol. 15, pp. 1–12, doi: 10.3390/en15238863.
8. Defend, R.O., Paraiso, P.R. and de Matos Jorge, L.M. (2015), «Modeling, simulation, and validation of an electric heater model operating in the transient regime», *Engevista*, Vol. 17, No. 3, pp. 421–432, doi: 10.22409/engevista.v17i3.665.
9. Brown, B.R. and Mahajan, S.M. (2021), «Circuit-Based Mathematical Model of an Arc Heater for Control System Development», *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 143085–143092, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3121189.
10. Hosain, M.F., Paul, R. and Chaklader, S. (2014), «Design & Fabrication of a Microcontroller Based Digital Temperature Controller to Control Heater», *National Conference on Photonics and Nanotechnology (NCPNT)*, 2 May, RUET, Rajshahi, Bangladesh, pp. 1–4.
11. Airij, A.G., Sudirman, R., Sheikh, U.U. et al. (2019), «Comparative Study on the Measurement of Human Thermal Activity», *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, Vol. 9, No. 6, pp. 2160–2165, doi: 10.18517/ijaseit.9.6.9958.

Євсєєнко Олег Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

<https://orcid.org/0000-0001-5432-1211>.

Наукові інтереси:

– розробка автоматизованих систем керування технологічними процесами.

E-mail: olegjevseienko@gmail.com.

Гапон Анатолій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

<https://orcid.org/0000-0002-2582-6154>.

Наукові інтереси:

– аналогова та цифрова схемотехніка.

E-mail: anatolii.hapon@khp.edu.ua.

Yevseienko O.M., Gapon A.I.

Control system of an electric heater using a thyristor switch

The article investigates the process of developing a software model of a shopping center building for a simulator stand. The operation of electric heaters is common across various industries – from space heating to large-scale thermal energy production. The design of a control system for electric heaters depends on the type of voltage, the control law, and the power rating of the heater. This paper analyzes the advantages and disadvantages of different control strategies for managing both low- and high-power heaters. A review of sources highlights the widespread use of electric heaters in many fields to ensure optimal temperature conditions – in heating systems, production and technological processes, as well as to enhance comfort and safety in both domestic and industrial settings. For efficient operation of such systems, the implementation of energy-efficient control methods is essential. This article focuses on developing a control system for an electric heater using a thyristor switch. It presents a method for calculating the numerical value of the power generated by the heater during one half-cycle of thyristor operation. The study discusses the drawbacks of using the industrial power grid as a power source, particularly waveform distortion of the sinusoidal signal. To mitigate these drawbacks, it is proposed to perform multiple measurements during the key's opening to obtain accurate voltage values. This approach is recommended for use in the development of control systems for linear objects using prediction-based methods. The linear behavior of the object allows for forecasting its response to the influence of the heating element during a single half-cycle, enabling efficient control even of high-power heaters. The paper presents the results of calculating relative errors when using the DS18B20 digital temperature sensor. Future research aims to integrate the obtained results into existing control systems for electric heaters.

Keywords: thyristor controller; control system; electric heater.

Стаття надійшла до редакції 18.04.2025.