

УДК 378.016:621.3

DOI <https://doi.org/10.32820/2074-8922-2019-64-81-91>

УЗАГАЛЬНЕНА ТРИСКЛАДОВА ГІБРИДНА МОДЕЛЬ ЗМІСТУ НАВЧАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

© Лазарєв М.І., Мосієнко Г.М., Тарасенко А.І.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Лазарєв Микола Іванович: ORCID: 0000-0001-9742-4739; lazarev@uipa.edu.ua; доктор педагогічних наук; професор кафедри креативної педагогіки і інтелектуальної власності; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мосієнко Ганна Миколаївна: ORCID: 0000-0001-5603-8380; mosienko@uipa.edu.ua; старший викладач кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Тарасенко Анатолій Іванович: ORCID: 0000-0002-0896-3587; tarasenko@uipa.edu.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглянуто проблему формування узагальненої моделі змісту навчання елементів електротехнічних пристроїв промислового обладнання на основі системного підходу. На основі проведеного аналізу літературних джерел електротехнічної підготовки інженерів неелектричних спеціальностей показано, що результатом теоретичної і практичної підготовки майбутніх інженерів повинна стати їх здатність обирати необхідні електротехнічні, електронні, електровимірювальні пристрої, вміти їх правильно експлуатувати і створювати разом із інженерами-електриками технічні завдання на розробку електричної частини автоматизованого обладнання для управління виробничими процесами. Показано, що всі фізичні елементи реальних електричних кіл, які застосовуються в промисловому обладнанні, мають ознаки основних електричних параметрів. Електричні параметри характеризуються тими фізичними явищами, які викликають процеси, що в них відбуваються. Кожен фізичний елемент реальної предметної галузі можна представити у вигляді визначеного з'єднання певної сукупності ідеальних елементів. Представлення фізичних елементів у розрахункових схемах залежить від частоти змінного струму.

Але всю складність фізичних процесів, які відбуваються в колах змінного струму, необхідно враховувати далеко не в усіх випадках. Можна зробити ряд допущень, які суттєво спрощують задачу і разом із тим не призводять до помітних відхилень від дійсності.

Обґрунтована важливість побудови узагальнених моделей реальних елементів електротехнічних пристроїв промислового обладнання на основі найбільш поширених видів моделювання, які застосовуються в технічних теоріях. Такий підхід до формування трискладової моделі елементів та пристроїв електротехнічного обладнання можна застосувати для побудови моделі будь-якого навчального елемента змісту навчання електротехніки. Цей метод дає можливість формалізувати процес моделювання, об'єднавши його основні фрагменти на основі запропонованого системного підходу.

Ключові слова: схеми заміщення, інформаційна модель, топологічна модель, математична модель, ідеалізовані елементи електротехніки, електротехнічне обладнання.

Лазарєв Н.И., Мосиенко А.Н., Тарасенко А.И. «Обобщенная трехкомпонентная гибридная модель содержания обучения элементов электротехнического оборудования»

В статье рассмотрена проблема формирования обобщенной модели содержания обучения элементов электротехнических устройств промышленного оборудования на основе системного подхода. На основе проведенного анализа литературных источников электротехнической подготовки инженеров неэлектрических специальностей показано, что результатом теоретической и практической подготовки будущих инженеров должна стать их способность выбирать необходимые электротехнические, электронные, электроизмерительные устройства, уметь их правильно эксплуатировать и создавать совместно с инженерами-электриками технические задания на разработку электрической части автоматизированного оборудования для управления производственными процессами. Показано, что все физические элементы реальных электрических цепей, применяемых в промышленном оборудовании, имеют признаки основных электрических

параметров. Электрические параметры характеризуются теми физическими явлениями, которые вызывают процессы, в них протекающие. Каждый физический элемент реальной предметной области можно представить в виде определенного соединения некоторой совокупности идеальных элементов. Представление физических элементов в расчетных схемах зависит от частоты переменного тока.

Но всю сложность физических процессов, происходящих в цепях переменного тока, необходимо учитывать далеко не во всех случаях. Можно сделать ряд допущений, которые существенно упрощают задачу и вместе с тем не приводят к заметным отклонениям от действительности.

Обоснована важность построения обобщенных моделей реальных элементов электротехнических устройств промышленного оборудования на основе наиболее распространенных видов моделирования, которые применяются в технических теориях. Рассмотренный подход к формированию трехкомпонентной модели элементов и устройств электротехнического оборудования можно применить для построения модели любого учебного элемента содержания обучения электротехники. Этот метод дает возможность формализовать процесс моделирования, объединив его основные фрагменты на основе предложенного системного подхода.

Ключевые слова: схемы замещения, информационная модель, топологическая модель, математическая модель, идеализированные элементы электротехники, электротехническое оборудование.

N. Lazarev, H. Mosiienko, A. Tarasenko "The generalized three-component hybrid model of the content of teaching elements of electrical equipment"

The article deals with the problem of forming a generalized model of the content of teaching elements of electrical devices of industrial equipment based on a systems approach. Based on the analysis of the literature sources on electrical engineering training of non-electrical specialties, it is shown that the result of theoretical and practical training of future engineers should consist in their ability to choose the necessary electrotechnical, electronic, electrical measuring devices, to operate them properly and to create, together with electrical engineers, technical specifications on the development of electrical parts of automated production equipment for managing production processes. It is shown that all physical elements of real electrical circuits used in industrial equipment have signs of basic electrical parameters. Electrical parameters are characterized by those physical phenomena that cause the processes occurring in them. Each physical element of a real subject area can be represented as a specific connection of a certain set of ideal elements. The representation of physical elements in design schemes depends on the frequency of the alternating current.

But all the complexity of the physical processes occurring in AC circuits should not necessarily be taken into account in every single case. You can make a number of assumptions that greatly simplify the task and at the same time do not lead to noticeable deviations from reality.

The importance of building generalized models of real elements of electrical devices of industrial equipment based on the most common types of modeling, which are used in technical theories, is substantiated. The considered approach to the formation of a three-component model of the elements and devices of electrical equipment can be used to build a model of any educational element of the content of electrical engineering education. This method makes it possible to formalize the modeling process by combining its main fragments based on the proposed system approach.

Keywords: equivalent circuits, information model, topological model, mathematical model, idealized elements of electrical engineering, electrical equipment.

Постановка проблеми. При вивченні курсу електротехніки та інших електротехнічних дисциплін для аналізу режимів роботи електротехнічного обладнання використовують ідеалізовані моделі, які створюють на основі абстракцій [1-2]. Електричні кола є сукупністю взаємно з'єднаних елементів, кожний з яких є реальним конструктивно незалежним електротехнічним пристроєм.

З моделей окремих найпростіших електротехнічних елементів, які мають певні

електромагнітні властивості, складають модель електричного кола. Модель кола – це графічне зображення системи рівнянь рівноваги (динамічних рівнянь) [3], які описують поведінку цього кола.

Перехід від реальних об'єктів, пристроїв до їх моделей і є процесом моделювання, тобто майбутнього інженера необхідно навчити за конкретним фізичним об'єктом бачити те, що називається еквівалентною схемою, або схемою заміщення, і що насправді є ідеалізованою моделлю. Для того, щоб

навчитися це робити, він повинен оволодіти основами моделювання [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Підготовка інженера неелектричного профілю обов'язково містить електротехнічну складову, як невід'ємну частину його майбутньої професійної діяльності в сучасних умовах високотехнологічного автоматизованого виробництва. Вивчаючи електротехніку, студент повинен засвоїти основи теорії електричних та магнітних кіл, принцип дії та основні характеристики трансформаторів, електричних машин, вимірювальних приладів та інших електротехнічних пристроїв. Автори підручників і навчальних посібників з електротехніки акцентують увагу на роз'ясненні специфіки електротехнічної підготовки спеціалістів [1-2, 5-7]. Важливо показати, що поряд із концептуальним і математичним апаратом надзвичайно важливу роль відіграють ідеалізовані, досить абстрактні схеми. Вони представляють собою сукупність абстрактних об'єктів, зорієнтованих, з одного боку, на застосування відповідного математичного апарата, а з другого – на теоретичний експеримент, тобто на проектування можливих експериментальних ситуацій [4].

Результатом теоретичної і практичної підготовки майбутніх інженерів повинна стати їхня здатність обирати необхідні електротехнічні, електронні, електровимірювальні пристрої, вміти їх правильно експлуатувати і створювати разом із інженерами-електриками технічні завдання на розробку електричної частини автоматизованого обладнання для управління виробничими процесами [6]. Для цього майбутньому фахівцю необхідно:

- знати галузь застосування електротехнічних пристроїв, способи їх з'єднання, методику складення рівнянь електричного стану, вольт-амперні характеристики;

- розуміти сутність енергетичних процесів, що відбуваються в активних і пасивних елементах електричних кіл;

- вміти проводити аналіз електричних кіл, використовуючи класичні методи розрахунків, які базуються на застосуванні основних електротехнічних законів.

Тобто побудова абстрактних об'єктів є специфічною і обов'язковою для технічної теорії і робить їх однаковими в тому плані, що вони сконструйовані, по-перше, за допомогою фіксованого набору елементів, і, по-друге,

обмеженого і заданого набору способів їх з'єднання. Буд-які електротехнічні пристрої можуть бути представлені як утворені з ієрархічно організованих кіл, блоків, з'єднань і елементів [4].

Все це фрагментарно має місце в більшості підручників та навчальних посібників з електротехніки, але відсутній системний підхід до формування узагальнюючої багатоскладової моделі змісту навчання елементів промислового електротехнічного обладнання.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення принципів формування узагальненої трискладової моделі змісту навчання елементів електротехнічних пристроїв промислового обладнання на основі системного підходу.

Виклад основного матеріалу. Побудова моделей електротехнічних пристроїв є необхідною, важливою і досить складною задачею, без вирішення якої неможливе вивчення властивостей, характеристик, енергетичних залежностей і поведінки електротехнічного пристрою в конкретних експлуатаційних умовах.

Загалом всі фізичні елементи реальних електричних кіл, які застосовуються в промисловому обладнанні, мають ознаки основних електричних параметрів. Електричні параметри характеризуються тими фізичними явищами, які викликають процеси, що в них відбуваються. Кожен фізичний елемент реальної предметної галузі можна представити у вигляді визначеного з'єднання деякої сукупності ідеальних R , L , C , E елементів. Представлення фізичних елементів у розрахункових схемах залежить від частоти змінного струму.

Але всю складність фізичних процесів, які відбуваються в колах змінного струму, необхідно враховувати далеко не в усіх випадках. Навпаки, в більшості випадків можна зробити ряд допущень, які суттєво спрощують задачу і разом із тим не призводять до помітних відхилень від дійсності.

Рівномірний розподіл електричного і магнітного полів вздовж кола спостерігається в порівняно рідких випадках. Значно частіше магнітне і електричне поля розподіляються вздовж кола нерівномірно. На одних ділянках кола, наприклад у конденсаторах, переважає електричне поле на других ділянках. Наприклад, у котушках індуктивності переважає магнітне поле і основними виявляються явища, які виникають внаслідок

зміни магнітного поля. Таким же чином перетворення електромагнітної енергії в теплову часто буває зосереджене в основному на деяких конкретних ділянках кола.

Так, реостат поряд з опором R має також деяку ємність між окремими його витками і деяку індуктивність. Однак, якщо частота змінного струму невелика або взагалі струм змінюється за будь-яким законом досить повільно, то струми зміщення, які відгалужуються від відрізків дроту в діелектрик, мізерно малі в порівнянні зі струмом, що протікає в дроті реостата. Цими струмами зміщення в такому випадку можна знехтувати, що еквівалентно тому, що ємність C між відрізкамі дроту реостата приймається рівній нулю. Так саме при низькій частоті струму або взагалі при повільній його зміні можна знехтувати електрорушійною силою самоіндукції в реостаті в порівнянні з падінням напруги в його опорі, що еквівалентно прийняттю рівній нулю індуктивності L реостата. Таким чином, абстрагуючись від дійсно складної картини явища, можна допустити, що реостат має тільки опір R . Відмітимо, що таку ділянку кола можна характеризувати також її провідністю $g = 1/R$ [8].

В якості другого прикладу розглянемо конденсатор. Майже до дуже високих частот можна знехтувати індуктивністю L конденсатора і враховувати тільки його ємність C . Якщо в колі знаходяться резистор і конденсатор, а енергія, яка поглинається в резисторі, значно перевищує енергію, яка втрачається в діелектрику конденсатора, то в першому наближенні останньою можна знехтувати або навіть можна врахувати її при розрахунку відповідної зміни опору резистора. При такій абстракції допускаємо, що конденсатор має тільки ємність C .

І нарешті, важливим прикладом є індуктивна котушка. Якщо частота струму в котушці не дуже велика, то можна знехтувати струмами зміщення між витками дроту

катушки в порівнянні зі струмом провідності в самій котушці, тобто знехтувати ємністю C між витками катушки. При високій частоті можна знехтувати падінням напруги в опорі дроту катушки в порівнянні з ЕРС, яка в ній виникає, тобто вважати для катушки опір $R = 0$. При бажанні можна врахувати опір катушки, припустивши умовно, що послідовно з катушкою, яка має опір $R = 0$, включено резистор, який має опір рівний опору дроту реальної катушки. При такій абстракції катушку індуктивності можна представити тільки параметром L [9].

Згідно з термінологією теорії моделювання, модель – це умовний образ об'єкта дослідження, який створюється так, щоб відобразити будову, властивості, взаємозв'язки, параметри об'єкта, які є суттєвими для дослідника. Таким чином, моделювання є одним із найефективніших методів дослідження реально існуючих об'єктів на їх моделях [3,6]. Метою моделювання є отримання пояснень явищ (процесів), які відбуваються в об'єктах, а також для передбачення явищ, що цікавлять дослідника [10].

Класифікація моделей передбачає їх відмінність за певними ознаками. Так, серед найбільш поширених видів моделей, відмічають три види: математичну модель, графічну (топологічну) модель, модель за типом мови опису – інформаційна модель. У нашому випадку інформаційну модель можна класифікувати як системно-інформаційну, враховуючи застосування системного підходу в процесі її формування.

Базуючись на цій інформації, застосуємо відмічені види моделей для побудови узагальненої трискладової гібридної моделі змісту навчання електротехніки, яка представлена на рис. 1.

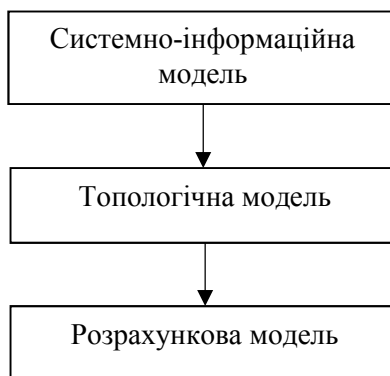


Рис. 1. Структура узагальненої трискладової гібридної моделі змісту навчання електротехніки

Розглянемо процес побудови складових моделі змісту навчання.

Розіб'ємо процес побудови моделі на три етапи.

На першому етапі розробляємо першу складову – системно-інформаційну модель.

Інформаційне моделювання [11] складається в нашому випадку з виділення в різноманітті електротехнічних пристроїв інформаційних суттєвостей, їх атрибутів і зв'язків між ними.

Інформаційне моделювання – процес описування або побудови моделі предметної галузі в тому вигляді або форматі, які, по-перше, легко сприймаються людиною, і, по-друге, легко можуть бути перетворені в набір специфічних елементів інформаційного характеру.

Серед інформаційних елементів можна виділити такі [12]:

1. Опис (визначення).
2. Призначення.
3. Будова.
4. Принцип дії.
5. Умови роботи.
6. Характеристики.
7. Галузь застосування.

Існує множина електротехнічних об'єктів O промислової галузі, яка є підмножиною множини промислового обладнання P даної галузі, тобто

$$O \subseteq P$$

На етапі розробки системно-інформаційної моделі скористаємося методикою побудови моделей будь-яких об'єктів [12], виділяючи з усієї безлічі ознак реального об'єкта лише ті, які дозволяють сформулювати умови для створення цілісної моделі електротехнічного пристрою промислового обладнання

$$O = \{ R, S, D, H \},$$

де O – електротехнічний об'єкт промислової галузі;

$R \{ R_1, R_2, \dots, R_i \}$ – множина ознак, які визначають призначення та використання електротехнічного об'єкта;

$S \{ S_1, S_2, \dots, S_n \}$ – множина ознак, які визначають структуру, склад, будову або конструкцію електротехнічного об'єкта;

$D \{ D_1, D_2, \dots, D_m \}$ – множина ознак, які визначають принцип дії та особливості функціонування електротехнічного об'єкта;

$H \{ H_1, H_2, \dots, H_k \}$ – множина ознак, які визначають параметри, характеристики та властивості електротехнічного об'єкта.

На другому етапі розглянемо побудову другої складової – топологічну модель.

Мета моделювання на цьому етапі полягає в тому, що, базуючись на результатах отриманих на першому етапі, треба визначити структуру топологічної моделі, скласти еквівалентну схему заміщення реального об'єкта, визначити складові схеми заміщення, які представлені ідеальними елементами електротехніки і визначити зв'язки між ними.

Сучасні вимоги до електротехнічних пристроїв ведуть до все більшого їх ускладнення. До складу таких пристроїв усе частіше входять елементи електроніки, елементи автоматичного управління та регулювання, і в номенклатурі пристроїв вони виступають як комплектні електротехнічні пристрої промислового обладнання. Для визначення параметрів елементів, які відповідають оптимальним режимам роботи таких складних схем, необхідно проводити загальний аналіз роботи електричного кола. Для цього широко застосовуються так звані символні методи аналізу електричних кіл, які засновані на застосуванні матричної алгебри, теорії графів та теорії множин [13]. Але в нашому випадку ми розглядаємо побудову топологічної моделі електричного кола як еквівалентну схему взаємозв'язків параметрів, які характеризують конкретний пристрій в реальних умовах експлуатації, тобто нам необхідна схема заміщення фізичного об'єкта. Важливість схеми заміщення для аналізу роботи кола обумовлена тим, що ми маємо можливість отримати схемні зв'язки між елементами, а також високу ступінь формалізації. Найважливішим є завдання розглянути варіанти можливих схем у залежності від умов роботи та режимів

Характеристики реальних двополюсних елементів резистора, котушки індуктивності та конденсатора відрізняються від характеристик ідеальних елементів. Це відбувається через те, що виникають втрати потужності в проводах, пластинах та діелектрику конденсатора, магнітопроводі котушки, а також від впливу супутніх параметрів елементів. Ці явища враховуються в схемах заміщення додатковими ідеальними елементами, які включаються послідовно або паралельно щодо основного параметра, який характеризує фізичний об'єкт.

Втрати потужності в діелектрику конденсатора і в магнітопроводі котушки, які виникають в змінних електромагнітних полях, приблизно пропорційні квадрату діючого значення напруги. Тому для врахування цих втрат в схеми заміщення пристроїв вводять резистивні елементи, які включають паралельно основному елементу.

Втрати в дротах, обмотках котушок та пластинах конденсаторів враховуються послідовно підключеними резистивними елементами, тому що ці втрати пропорційні квадрату діючого значення струму в пристрої. Необхідно враховувати те, що оскільки втрати в діелектрику та в магнітопроводі є функціями частоти, значення опорів, які враховують ці втрати, також будуть частотно-залежними [14].

На третьому етапі створюємо третю складову – розрахункову модель.

Розрахункова модель передбачає наявність конкретного завдання з розрахунку необхідних параметрів, режимів, характеристик, експлуатаційних величин, які необхідно знати для вирішення виробничих задач з експлуатації, модернізації, удосконалення роботи промислового обладнання.

Фактично розрахункова модель – це математична модель, яка представляє собою систему математичних виразів, які описують характеристики об'єкта моделювання.

Розглянемо поетапну побудову моделі електротехнічного пристрою як реального фізичного об'єкта на основі узагальненої гібридної моделі. Для цього наведемо приклад побудови моделі електротехнічного елемента промислового обладнання машинобудівної галузі – резистора.

Визначимо послідовність побудови моделей електротехнічних пристроїв, основне призначення яких – створення опору протіканню електричного струму в електричних колах різноманітного призначення. Під терміном «резистор» в даному випадку будемо розуміти всі ті електротехнічні пристрої, в яких основний параметр (параметр, заради якого вони створювались) є параметр R , омичний або активний опір. Це передусім безпосередньо резистори постійного та змінного опору, пускові та регулювальні реостати, зразкові резистори опору, з'єднувальні дроти та ін.

Перший етап. Побудова інформаційної моделі реального електротехнічного елемента – резистора.

Ознака R : R_1 – створення опору протіканню електричного струму; R_2 – забезпечення необхідних режимів роботи електротехнічного об'єкта; R_3 – забезпечення безпечних умов експлуатації промислового обладнання.

Ознака S : S_1 – діелектрична основа основного елемента; S_2 – основний елемент з провідникового матеріалу; S_3 – виводи або затискачі.

Ознака D : D_1 – опір матеріалу провідника протіканню електричного струму; D_2 – перетворення електричної енергії в теплову.

Ознака H : H_1 – опір; H_2 – струм; H_3 – напруга; H_4 – потужність; H_5 – робоча температура; H_6 – масо-габаритні параметри; H_7 – вольт-амперна характеристика; H_8 – ВЧ-параметри.

На другому етапі побудуємо топологічну модель фізичного об'єкта, тобто розглянемо визначення можливих схем заміщення в залежності від умов експлуатації електротехнічного пристрою.

На етапі топологічного моделювання фізичного об'єкта розглянемо схеми заміщення резистора, як конструктивного елемента електротехнічної складової промислового обладнання. Структура схем залежить від цілого ряду факторів. Перш за все необхідно враховувати умови експлуатації резистора, характеристики джерела живлення, конструктивні особливості та технологію виготовлення елемента. На рис. 2 представлені варіанти топологічних моделей резистора.

Модель резистора на рис. 2, а є ідеальною, тому що представлена одним параметром і не враховує інші супутні параметри, які мають місце в реальному елементі. Така модель може бути прийнята в таких випадках:

1. Резистор працює в колі постійного струму і враховує тільки омичний (активний) опір резистора і його властивість, перетворювати електричну енергію в інші види енергії.

2. Резистор працює в колі змінного струму низької частоти (промислова частота), і супутні параметри на цій частоті мають малі значення щодо основного параметра, тобто ними можна знехтувати без суттєвого впливу на результати розрахунку.

3. Резистор працює в колі змінного струму, але технологія його виготовлення не передбачає наявності супутніх параметрів, значення яких необхідно враховувати.

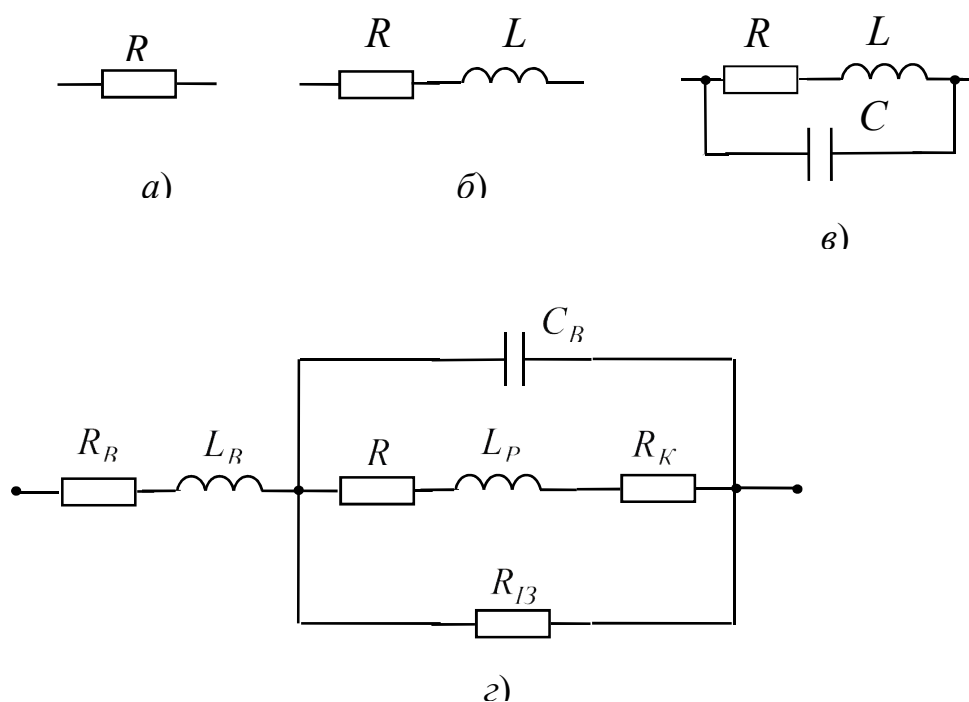


Рис. 2. Схеми заміщення резистора

Модель резистора на рис. 2, б є вже більш складною і враховує такий супутній параметр, як індуктивність. Цей параметр залежить від багатьох факторів і перш за все від таких, що виводять параметр індуктивності на такий рівень, при якому опір, що створює цей параметр в електричному колі, суттєво впливає на режим роботи навантаження. Серед таких факторів слід зазначити:

1. Технологія виготовлення резистора. Резистор при виготовленні, якого застосовувалась намотка дроту на діелектричний каркас, має досить велику індуктивність, тому що має місце потокозчеплення магнітного потоку з витками резистора, що створюється особливостями конструкції (намотка котушки).

2. Конструкція резистору передбачає наявність відносно довгих виводів складної конфігурації. Індуктивність виводів такої форми може суттєво впливати на режими роботи резистора і її необхідно враховувати при побудові моделі елемента.

У моделі, представлений на рис. 2, в враховується міжвиткова ємність. Поряд із раніше розглянутими параметрами модель доповнена третім параметром. Такий варіант еквівалентної електричної схеми пропонується при побудові моделі резистора, який

застосовують у вимірювальній техніці (зразкового опору) [15]. Окрім основного параметра R , при застосуванні резистора у вимірювальних колах змінного струму, особливо при підвищеній частоті, необхідно враховувати і супутні параметри L і C . За допомогою деяких конструктивних заходів значення цих параметрів намагаються звести до мінімуму (біфілярна намотка, секціонування), та все ж при побудові математичної моделі елемента їх, як буде показано нижче, необхідно враховувати. Таку ж модель резистора пропонують і інші автори [14, 16], вважаючи, що необхідно враховувати супутні параметри L і C при роботі на високих частотах.

Для врахування всіх особливостей тих процесів, які відбуваються в реальному резисторі при різних частотах джерела живлення, схема заміщення набуває досить складного вигляду (рис. 2, г.) [17].

Так, поряд з основним параметром (елементом) R , показані супутні параметри, які суттєво залежать від конструкції реального елемента, технології його виготовлення і властивостей матеріалів, що входять до його складу [4]. На рис. 2 г позначено:

- R_{IZ} – опір ізоляції; який необхідно враховувати при побудові моделей високоомних резисторів, а також резисторів, що працюють при високій напрузі;

- R_K – опір контактів, залежить від матеріалу (мідь, срібло, полуда), а також від робочої площі контактів;

- R_B – опір виводів, залежить від матеріалу, площі перерізу, довжини виводів;

- L_P – індуктивність резистора, визначається технологією виготовлення резистора та його конструкцією. Так, резистори, виготовлені шляхом намотки дроту на ізоляційний каркас, мають досить велику індуктивність;

- L_B – індуктивність виводів, залежить від довжини та конфігурації виводів;

- C_B – ємність між выводами, залежить від конструкції резистора. При намотці дроту на ізоляційний каркас сумарна міжвиткова ємність може бути досить значною.

Чим вище точність розрахунків, тим більша кількість факторів повинна враховуватись при побудові моделі і тим складніший вигляд буде мати еквівалентна схема кожного елемента предметної галузі. Разом із тим ускладнення еквівалентних схем суттєво збільшує трудомісткість розрахунків, тому при аналізі електричних кіл необхідно прагнути до використання спрощених схем заміщення реальних елементів, які б склалися з мінімальної кількості обґрунтовано необхідних ідеалізованих елементів.

Але в кожному конкретному випадку схеми заміщення одного і того самого елемента можуть мати різний вигляд у залежності від робочого частотного діапазону.

На третьому етапі побудуємо розрахункову (математичну) модель фізичного об'єкта, тобто розглянемо визначення можливих математичних залежностей, які зв'язують основні електричні величини з параметрами схеми заміщення з урахуванням умов експлуатації електротехнічного пристрою. За результатами третього етапу моделювання з'являється можливість провести необхідні розрахунки параметрів та режимів роботи конкретних фізичних об'єктів.

Параметр R , який є основним параметром резистивного елемента, характеризується такими залежностями:

1. Залежність параметра від властивостей матеріалу, з якого виготовлено резистор, та від його геометричних розмірів

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де ρ – питомий опір матеріалу елемента;
 l – довжина провідника, з якого виготовлено

резистор; S – площа поперечного перерізу провідника.

2. Залежність параметра від температури. У процесі експлуатації необхідно знати опір резистора при температурі навколишнього середовища, а також опір при роботі елемента з різним ступенем навантаження

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(T_2 - T_1)],$$

де R_1 – опір елемента при температурі T_1 ; T_2 – робоча температура елемента; α – температурний коефіцієнт опору.

3. Вплив основного параметра на енергетичні характеристики резистора:

- струм, який проходить через елемент

$$I = \frac{U}{R}.$$

- потужність, яка виділяється на елементі

$$P = I^2 R, \quad P = \frac{U^2}{R}.$$

- електрична енергія, яка споживається елементом

$$W = I^2 R t,$$

4. Залежність повного опору резистора від частоти джерела живлення. При врахуванні супутніх параметрів у моделях резистора представлених на рис. 2 для моделі на рис. 2, б маємо

$$\underline{Z} = R + j\omega L.$$

Для моделі (рис. 2, в) повний опір схеми заміщення пропонується [18] в такому вигляді

$$\underline{Z} = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R^2} + j\omega \frac{L - R^2 C - \omega^2 LC}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R^2}$$

Цей вираз можна значно спростити, якщо знехтувати тими його складовими, які стосовно основного параметра будуть мати мізерно малі значення при відносно невисоких частотах джерела живлення

$$\underline{Z} = R + j\omega(L - R^2 C).$$

Для повної моделі резистора (рис. 2, з) математичні залежності, які зв'язують між собою всі параметри, що входять в схему

заміщення, а також їх зв'язок з енергетичними характеристиками елемента, мають досить складну структуру. Застосування такої моделі виправдано тільки в тому випадку, коли необхідно врахувати всі

її складові і вони мають домінуючий вплив на режими роботи елемента в конкретних умовах експлуатації.

Модель змісту навчання резистора в компактному вигляді представлена на рис. 3.

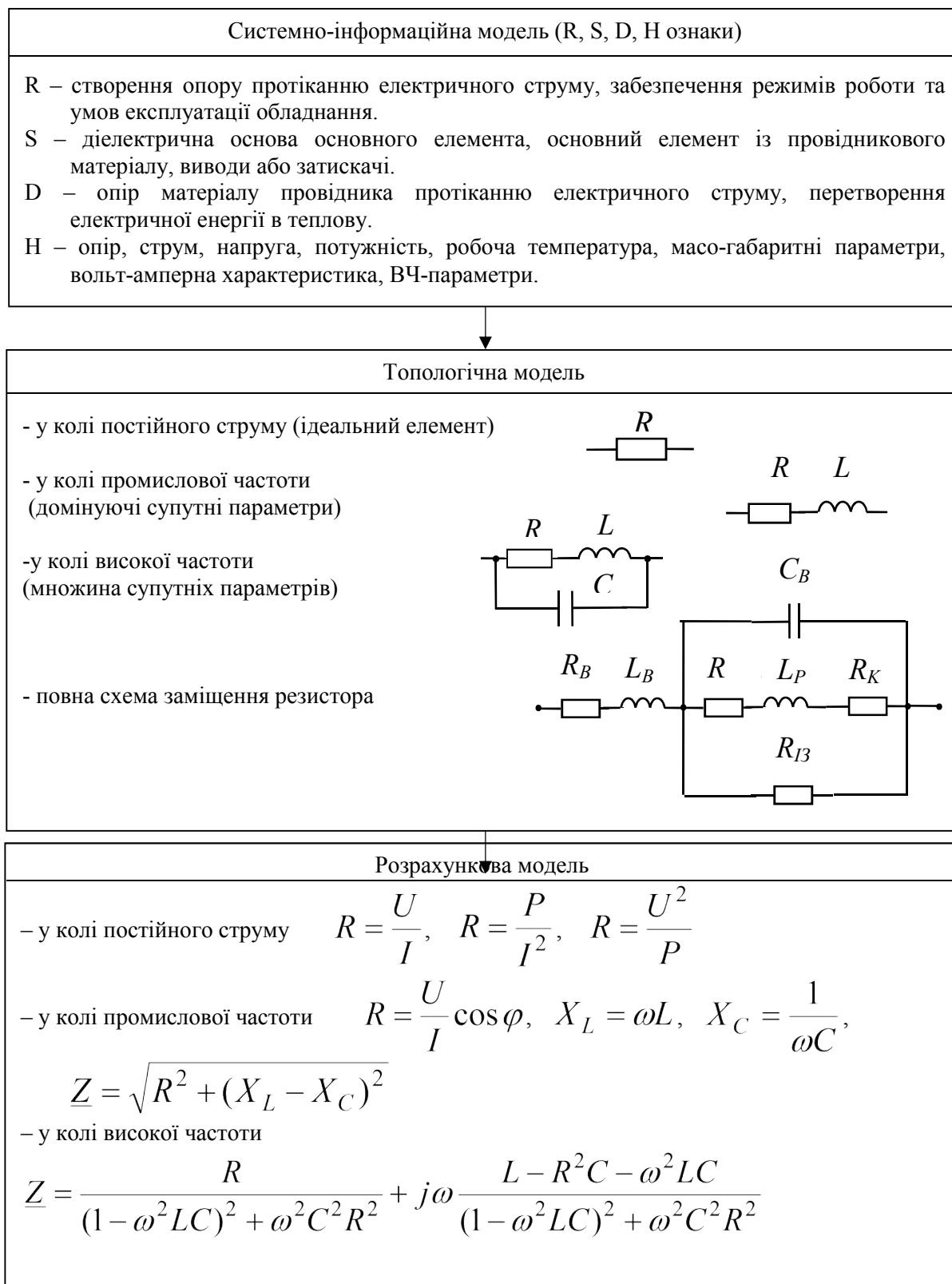


Рис. 3. Трискладова гібридна модель змісту навчання елемента промислового обладнання – резистора

Висновки. Розглянутий підхід до формування трискладової гібридної моделі елементів та пристроїв електротехнічного обладнання можна застосувати для побудови моделі будь-якого реального елемента електротехніки. Цей метод дає можливість формалізувати процес моделювання, об'єднавши його основні фрагменти на основі запропонованого системного підходу.

Список використаних джерел

1. Електротехніка / Х. Э. Зайдель, В. В. Коген-Далин, В. В. Крымов и др.; под ред. В. Г. Герасимова. – М. : Высшая школа, 1985. – 480 с.
2. Міліх В. І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка / В. І. Міліх, О. О. Шавьолкін. – Київ : Каравела, 2007. – 688 с.
3. Сиберт У. М. Цепи, сигнали, системи: В 2-х ч. Ч. 1: Пер. с англ. / У. М. Сиберт. – М.: Мир, 1988. – 336 с.
4. Лазарев М. І. Професійно-орієнтоване формування моделей електротехнічних пристроїв промислового обладнання / М. І. Лазарев, Г. М. Мосієнко, А. І. Тарасенко // Проблеми інженерно-педагогічної освіти: зб. наук. праць. – Харків : УПА, 2018. – Вип. 58. – С. 27-35.
5. Електротехніка / М. Ю. Анвельт, В. Г. Герасимов, В. П. Данильченко [и др.]; под ред. В. С. Пантюшина. – М. : Высшая школа, 1976. – 560 с.
6. Беневоленский С. Б. Основы электротехники / С. Б. Беневоленский, А. Л. Марченко. – М. : Изд-во Физ.-мат. литературы, 2006. – 568 с.
7. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка / М. С. Будіщев. – Львів : «Афіша», 2001. – 424 с.
8. Мосієнко Г.М. Предметно-орієнтоване формування змісту дисципліни «Електротехніка» для майбутніх інженерів машинобудівних спеціальностей / Г. М. Мосієнко // Проблеми інженерно-педагогічної освіти : зб. наук. праць. – Харків : УПА, 2010. – Вип. 28-29. – С. 67-75.
9. Зевеке Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил [и др.]. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 444 с.
10. Справочник проектировщика АСУ ТП / Г. Л. Смилянский, Л. З. Амлинский, В. Я. Баранов [и др.]; под ред. Г. Л. Смилянского. – М. : Машиностроение, 1983. – 527 с.
11. Энсор Д. Orakl. Проектирование баз данных / Д. Энсор, И. Стивенсон. – Киев : Издательская группа ВНУ, 1999. – 560 с.
12. Лазарев М. І. Полісистемне моделювання змісту технологій навчання загально інженерних дисциплін / М. І. Лазарев. – Харків : Вид-во НФАУ, 2003. – 356 с.
13. Максимович Н. Г. Синтез электронных цепей с многополюсными элементами / Н. Г. Максимович, П. Г. Стахив., Ф. А. Шемуратов – Препринт – 186. – Киев : ИЭД АН УССР. – 1978. – 46 с.

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження можуть бути направлені на побудову моделей реальних елементів електричних кіл промислового устаткування. Перспективним є також застосування цього методу в процесі формування змісту навчання електротехніки для майбутніх інженерів неелектричних спеціальностей.

14. Прянишников В. А. Теоретические основы электротехники / В. А. Прянишников. – СПб.: КОРОНА, 2000. – 368 с.
15. Основы метрологии и электрических измерений / Б. А. Авдеев, Е. М. Антонюк, Е. М. Душин [и др.] ; под ред. Е. М. Душина. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
16. Теоретичні основи електротехніки: підручник у 3 т. / В. С. Бойко, В. В. Бойко, Ю. Ф. Видолоб [та ін.] ; за заг. ред. І. М. Чиженка, В. С. Бойка. – Київ : ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2004. – Т. 1 : Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 272 с.
17. Попов В. П. Основы теории цепей / В. П. Попов. – М. : Выш. шк., 2003. – 575 с.
18. Электрические измерения / Л. И. Байда, Н. С. Добротворский, Е. М. Душин [и др.] ; под ред. А. В. Фремке. – Л. : Энергия, 1980. – 392 с.

References

1. Zajdel, HJe, Kogen-Dalin, VV, Krymov, VV et al. 1985, *Jelektrotehnika*, [Electrical Engineering] Vysshaja shkola, Moskva.
2. Milykh, VI & Shavolkin, YuO O.2007, *Elektrotehnika, elektronika ta mikroprotsesorna tekhnika*, [Electrical engineering, electronics and microprocessor technology] Karavela, Kyiv
3. Sibert, UM 1988, *Cepi, signaly, sistemy*, [Circuits, signals, systems] part 1, Mir, Moskva.
4. Lazarev, MI, Mosiienko, HM & Tarasenko, AI 2018, 'Profesiino-oriietovane formuvannia modelei elektrotekhnichnykh prystroiv promyslovoho obladnannia'[Professionally oriented formation of models of electrotechnical devices of industrial equipment], *Problemy inzhenerno-pedahohichnoi osvity*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, iss. 58, pp. 27-35.
5. Anvelt, MJu, Gerasimov, VG, Danilchenko, VP et al. 1976, *Jelektrotehnika*, Vysshaja shkola, Moskva.
6. Benevolenskij, SB & Marchenko, AL 2006, *Osnovy jelektrotehniki*, [Electrical Engineering Basics] Izdatelstvo Fiziko-matematicheskoy literatury, Moskva.
7. Budishchev, MS 2001, *Elektrotekhnika, elektronika ta mikroprotsesorna tekhnika*, [Electrical engineering, electronics and microprocessor technology] Afisha, Lviv.

8. Mosiienko, HM 2010, *Predmetno-oriientovane formuvannia zmistu dystsypliny «Elektrotehnika» dlia maibutnikh inzheneriv mashynobudivnykh spetsialnostei*, [Subject-oriented formation of the content of the discipline "Electrical Engineering" for future engineers of mechanical engineering specialties] Problemy inzhenerno-pedahohichnoi osvity, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, iss. 28-29, pp. 67-75.
9. Zeveke, GV, Ionkin, PA, Netushil, AV et al. 1963, *Osnovy teorii cepej*, [Fundamentals of Chain Theory] Gosjenergoizdat, Moskva, Leningrad.
10. Smiljanskij, GL, Amlinskij, LZ, Baranov, VJa et al. 1983, *Spravochnik proektirovshhika ASU TP*, [Designer Reference] Mashinostroenie, Moskva.
11. Jensor, D & Stivenon, I 1999, *Orakl. Proektirovanie baz dannyh*, [Database Design] Izdatelskaja gruppa BHV, Kiev.
12. Lazariiev, MI 2003, *Polisystemne modeliuannia zmistu tekhnolohii navchannia zahalno inzhenernykh dystsyplin*, [Polysystemic modeling of content of technologies of teaching of general engineering disciplines] Vydavnytstvo Natsionalnoho farmatsevtichnoho universytetu, Kharkiv.
13. Maksimovich, NG, Stahiv, PG & Shemuratov, FA 1978, *Sintez jelektronnyh cepej s mnogopoljuskimi jelementami*, [Synthesis of electronic circuits with multipolar elements] Preprint – 186, Institut jelektrodinamiki Akademii nauk Ukrainskoj Sovetskoj Socialisticheskoy Respubliki, Kiev.
14. Prjanishnikov, VA 2000, *Teoreticheskie osnovy jelektronehniki*, [Theoretical Foundations of Electrical Engineering] KORONA, Sankt-Peterburg.
15. Avdeev, BA, Antonjuk, EM, Dushin, EM et al. 1987, *Osnovy metrologii i jelektricheskikh izmerenij*, [Fundamentals of Metrology and Electrical Measurements] Jenergoatomizdat, Leningrad.
16. Boiko, VS, Boiko, VV, Vydolob, YuF et al. 2004, *Teoretychni osnovy elektrotehniki*, [Theoretical foundations of electrical engineering] vol. 1 Ustaleni rezhymy liniinykh elektrychnykh kil iz zoseredzhenymy parametramy, Vydavnytstvo Politehnika, Kyiv.
17. Popov, VP 2003, *Osnovy teorii cepej*, [Fundamentals of Chain Theory] Vysshaja shkola, Moskva.
18. Bajda, LI, Dobrotvorskij, NS, Dushin, EM et al. 1980, *Jelektricheskie izmerenija*, [Electrical measurements] Jenergija, Leningrad.

Стаття надійшла до редакції 15.06.2019 р.