

ЗМІСТ

Передмова	4
Розділ 1 Нелінійні електричні кола постійного струму	9
Розділ 2 Магнітні кола постійного струму	64
Розділ 3 Усталені режими в нелінійних колах змінного струму	108
Розділ 4 Перехідні процеси в нелінійних електричних колах	182
Література	259

ПЕРЕДМОВА

Запропонований навчальний посібник узагальнює багаторічний досвід викладання дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», зокрема її важливої складової – «Теорії нелінійних електричних і магнітних кіл», у Вінницькому національному технічному університеті на кафедрі «Теоретична електротехніка та електричні вимірювання». В ньому наведено і докладно описано всі основні методи аналізу нелінійних електротехнічних систем із зосередженими параметрами, а також зібрано чимало гарних зразків урізноманітнених та цікавих вправ, прикладів і задач з теорії нелінійних кіл. Водночас видання є особливим і вирізняється з-поміж інших тим, що в ньому чи не вперше зроблено спробу через вищезазначені методи *розкрити суть та закономірності власне розвитку процесу розв'язування прикладних задач* теорії нелінійних електричних і магнітних кіл в поєднанні з ефективними формами донесення напрацьованих взаємопов'язаних методик, способів і прийомів до читача.

Успішне оволодіння навчальним матеріалом можливе тільки за вирішення водночас двох проблемних навчально-методичних задач:

а) перша з них – це засвоєння теоретичної частини дисципліни, що передбачає оволодіння глибокими *знаннями* теорії електричних та магнітних кіл на основі *розуміння* її законів, теорем та основних формул і співвідношень, які описують фізичні явища та процеси в зазначених системах;

б) друга – формування *вмінь та навичок* практичного застосовування накопиченої суми знань під час розв'язування різноманітних задач, що постають або можуть поставати в умовах прикладної діяльності майбутніх спеціалістів.

За своєю значимістю друга задача не тільки не поступається першій, але і має порівняно з нею неабияку вагу, позаяк ґрунтовне засвоєння теоретичного матеріалу неможливе без набуття практичних навичок. Успішне ж накопичення останніх виявляється ефективним під час розв'язування задач емпіричного, критичного або евристичного походження. Адже за необхідності теоретичні знання в чистому вигляді завжди можна швидко поповнити або відновити – для цього потрібно лише скористатися численними на сьогодні довідниковими літературними джерелами. Розв'язування ж практичних задач потребує якісно інших знань, умінь та навичок, які зазвичай формуються з набуттям досвіду протягом тривалого часу і в умовах урізноманітненої практичної діяльності спеціаліста. Водночас такі навички можуть бути закладені та істотно розвинуті і у інший спосіб – шляхом регулярного розв'язування практичних вправ, прикладів і задач, але за умови наявності спеціалізованих підручників, посібників та збірників задач, які б цілеспрямовано та на системному рівні формували у читача *вміння знаходити правильні та найраціональніші шляхи* під час розв'язування задач різної складності та тематики, а також сприяли б *самостійному* і порівняно швидкому набуттю майбутніми спеціалістами необхідного досвіду, творчого і незалежного мислення, критичного аналізу та вміння правильної обробки й інтерпретації отриманих ним як проміжних, так і остаточних результатів розрахунку.

На превеликий жаль, книги такого спрямування надзвичайно рідкісні та раритетні. Зокрема в теоретичній електротехніці подібних зразків навчальної літератури, написаних українською мовою, взагалі не існує. Обмаль їх також і у виданнях іншими мовами.

Природно, що така ситуація вкрай недопустима, оскільки оволодіння дисципліною без вміння розв'язування прикладних задач в принципі не може бути повним, навіть більше – такі знання в практичній діяльності взагалі виявляють себе або неспроможними, або даремними, і в усіх випадках – марнотратними.

Отож істотною і виокремлювальною ознакою запропонованого навчального посібника є те, що в ньому зроблено спробу не тільки подати та докладно описати всі класичні методи, що використовуються для розв'язування прикладних задач теорії нелінійних електричних та магнітних кіл, але і в кожному конкретному випадку сумістити застосування цих методів з *методологічним розбором і критичним аналізом сутності самого процесу розв'язування задачі*, висвітливши та пояснивши задля цього не тільки послідовність аналітичних дій, але і їх необхідність, доцільність, логіку, можливість альтернативи, особливості застосування тощо. Автори переконані, що саме такий підхід здатен сформувати в майбутнього спеціаліста той повний освітній базис, де гармонійно і своєрідно зможуть бути поєднані між собою і теоретичні знання, і вміння та навички їх практичного застосування, передовсім – в умовах сучасної динамічної реальності, яка потребує (доволі часто в складних умовах) і творчого мислення, і креативних рішень.

Наведений навчальний матеріал насамперед призначений для студентів та викладачів електротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Водночас він може стати в нагоді і інженерним та науковим співробітникам відповідних напрямків спеціалізації.

За своїм змістом методи аналізу нелінійних електричних та магнітних кіл поділяють на чотири основні групи:

- 1) графічні методи;
- 2) графо-аналітичні методи;
- 3) аналітичні методи;
- 4) чисельні методи.

Під час розв'язування прикладів та задач в запропонованому навчальному посібнику всі основні методи кожної з наведених груп знайшли своє відображення як в теоретичному висвітленні, так і в практичному застосуванні.

Зокрема, в *першому* розділі докладно в прикладах та задачах описані всі основні та допоміжні методи розрахунку нелінійних електричних кіл постійного струму, а саме:

- *аналітичний метод* (наприклад, задачі 1.2, 1.13, 1.18);
- *графічний метод* (задачі 1.1, 1.12, 1.13);
- *графо-аналітичний метод* (задачі 1.1, 1.3, 1.5, 1.19);
- *метод вибраних точок* (задача 1.2);
- *метод вузлових потенціалів* (задачі 1.3, 1.5);
- *метод графічного розв'язування двох рівнянь (метод перетинів)* (задачі 1.1, 1.5, 1.7, 1.14);

- *метод двох вузлів* (задачі 1.4, 1.12, 1.15);
- *метод еквівалентного генератора* (задачі 1.3, 1.6, 1.24);
- *метод ітерацій (послідовних наближень)* (задачі 1.3, 1.7);
- *метод найменших квадратів* (задача 1.2);
- *метод Ньютона–Рафсона* (задачі 1.2, 1.3, 1.7).

В другому розділі наведено основні методи розрахунку магнітних кіл постійного струму:

- *графічний метод* (наприклад, задача 2.2);
- *метод двох вузлів* (задача 2.8);
- *метод графічного розв'язування двох рівнянь* (задача 2.5).

В третьому розділі розглядаються основні та допоміжні методи аналізу нелінійних кіл змінного струму в ustalених динамічних режимах:

- *аналітичний метод* (наприклад, задачі 3.2, 3.27, 3.28);
- *метод вибраних точок* (задача 3.27);
- *метод гармонічного балансу* (задачі 3.20, 3.24, 3.34, 3.37, 3.38);
- *метод гармонічної лінеаризації* (задачі 3.20, 3.26, 3.37, 3.38);
- *метод еквівалентних синусоїд* (задачі 3.6, 3.7, 3.10, 3.21, 3.23, 3.31);
- *метод еквівалентного генератора* (задача 3.27);
- *метод ітерацій (послідовних наближень)* (задачі 3.26, 3.39);
- *метод кусково-лінійної апроксимації* (задача 3.16);
- *метод Ньютона–Рафсона* (задачі 3.4, 3.24, 3.26).

В четвертому розділі докладно описано основні методи розрахунку перехідного процесу в нелінійних колах, зокрема:

- *аналітичний метод* (наприклад, задачі 4.3, 4.4, 4.11, 4.20);
- *метод графічного інтегрування* (задача 4.2);
- *метод графічного розв'язування двох рівнянь (метод перетинів)* (задача 4.9);
- *метод кусково-лінійної апроксимації* (задачі 4.1, 4.5, 4.7, 4.12, 4.13, 4.15, 4.16, 4.21);
- *метод умовної лінеаризації* (задачі 4.1, 4.6, 4.19, 4.20);
- *метод малого параметра* (задача 4.4);
- *метод послідовних інтервалів (простий метод Ейлера)* (задачі 4.2, 4.3, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.12, 4.14, 4.17, 4.18, 4.19);
- *метод фазових траєкторій* (задачі 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.19).

Потрібно зазначити, що електромагнітні явища та процеси в нелінійних електричних колах порівняно з лінійними за своєю фізичною природою носять незрівнянно більш складний та урізноманітнений характер. Математично вони описуються *нелінійними* диференціальними або алгебраїчними рівняннями, що створює чимало доволі складних перешкод під час розрахунку та аналізу нелінійних електричних та магнітних кіл. В першу чергу, ситуацію ускладнює порушення *принципу накладання* (суперпозиції). Відтак практично всі методи, які використовуються для аналізу нелінійних кіл, є *наближеними*.

До зазначеного вище потрібно додати, що подані задачі мають різний ступінь складності.

Найпростіші та нескладні задачі наведені на початку кожного розділу. Такі задачі зазвичай розв'язуються шляхом безпосереднього застосування одного правила чи закону або ж підстановкою числових даних у відоме співвідношення.

Потому пропонуються типові та евристичні задачі підвищеної складності, які потребують поглибленого знання теорії, а також більш уважного та вдумливого підходу з обов'язково глибоким розумінням сутності задачі. Щодо перших, то для їх розв'язування в багатьох випадках на основі відомих правил та законів необхідно вміти складати і аналітично або графічно використовувати рівняння чи системи рівнянь, що пов'язують поміж собою вихідні дані задачі з невідомими та шуканими фізичними величинами. Другий тип задач більш важливий, про що потрібно окремо наголосити. Автори таким задачам приділили особливу увагу, вважаючи, що саме їх нетиповий характер зрештою і має виявляти наявність вмінь та навичок знаходити правильні та найбільш раціональні шляхи під час розв'язування прикладних та проблемних задач, які, цілком імовірно, поставатимуть перед спеціалістами під час їх майбутньої практичної діяльності.

Водночас в навчальному посібнику передбачено і задачі, які призначені для *самостійного розв'язування*: частина з них – для студентів заочної форми навчання, а інша – в аудиторії під керівництвом викладача. Комплекс задач для самостійного опрацювання пропонується наприкінці кожного розділу. В усіх випадках з методами, які необхідні для розв'язування таких задач, читач вже має бути ознайомлений в основній частині розділу. Для перевірки отриманого розв'язку практично до всіх задач наведено правильні відповіді. В найбільш складних випадках окремі із запропонованих задач додатково ще супроводжуються й стислими методичними порадами та вказівками.

Варто зазначити, що доволі часто запропоновані задачі відразу або відкладено розв'язуються із залученням декількох з можливих методів з наступним аналізом ефективності цих методів за тим чи іншим критерієм, наприклад, високою точністю розрахунку, мінімальною кількістю рівнянь в системі, меншими витратами часу на розв'язування тощо.

З метою концентрації уваги читача на методі та алгоритмі розв'язування задачі розглядаються переважно невеликі за обсягом обчислень задачі, які не потребують використання спеціальних обчислювальних засобів задля отримання і сприйняття числових значень шуканих фізичних величин. В тих випадках, де такий обсяг суттєвий, хід та послідовність власне обчислювальних операцій пропущено, а в отримані співвідношення у відповідних одиницях вимірювання лише підставлені числові значення та записано остаточний результат.

Водночас необхідно наголосити, що всі без винятку задачі за заданими методами розв'язані із залученням *сучасних програмних систем комп'ютерної математики* Mathcad та Maple. Також за допомогою цих програм розроблено якісний і математично точний ілюстративний матеріал, який супроводжує практично кожну із наведених задач. Принагідно зазначимо, що остання обставина також є важливою ознакою наявного навчального видання, яка вигідно вирізняє його з-поміж інших і, головне, суттєвим чином допомагає читачеві сприймати запропонований теоретичний та практичний матеріал.

Відзначимо, що викладення коротких теоретичних відомостей, які б відповідали змісту задач кожного з розділів, автори вважають недоцільним, головним чином тому, що весь теоретичний матеріал в більшості випадків в повному форматі наведено у відповідних підручниках, довідниках, навчальних посібниках та збірках задач, наприклад, [1–23]. Що ж до опису методів розрахунку нелінійних електричних та магнітних кіл, то в наявному виданні необхідні теоретичні відомості неодноразово і докладно наводяться під час методологічного розбору процесу розв’язування конкретних прикладів та задач.

Для розв’язування задач також необхідно добре знати фізичний зміст літерних позначень у формулах та правильно підставляти числові дані. Необхідно пам’ятати, що одиниці вимірювання наразі прийнято використовувати в Міжнародній системі одиниць СІ. Відтак в наших задачах напруга подається у *вольтах* (В), струм – в *амперах* (А), опір – в *омах* (Ом), індуктивність – в *генрі* (Гн), ємність – у *фарадах* (Ф), активна потужність – у *ватах* (Вт), реактивна потужність – у *вольт-амперах реактивних* (ВАр), повна потужність – у *вольт-амперах* (ВА), частота – в *герцах* (Гц), час – в *секундах* (с), магнітний потік – у *веберах* (Вб), магнітна індукція – в *теслах* (Тл), напруженість магнітного поля – в *амперах на метр* (А/м).

Доволі часто електротехнічні фізичні величини в посібнику подаються в кратних або частинних одиницях, для чого використані спеціальні приставки: 10^9 – *гіга* (Г); 10^6 – *мега* (М); 10^3 – *кіло* (к); 10^{-3} – *мілі* (м); 10^{-6} – *мікро* (мк); 10^{-9} – *нано* (н); 10^{-12} – *піко* (п).

Автори навчального видання висловлюють щире подяку рецензентам: завідувачу кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця) д. т. н., професору Бурбело М. Й., завідувачу кафедри комп’ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету (м. Київ) д. т. н., професору Кваснікову В. П., професору кафедри експериментальних досліджень Національного технічного університету України «КПІ» (м. Київ) д. т. н., професору Володарському Є. Т. за корисні поради, рекомендації та побажання.

Автори також з великою подякою сприймуть всі зауваження та побажання, висловлені читачами, що буде обов’язково враховане в нашій подальшій роботі. Їх можна направляти за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, кафедра теоретичної електротехніки та електричних вимірювань або на електронні поштові скриньки: wjg@ukr.net та teeb@i.ua.

Колектив авторів