УДК 51.7:53.072:519.8:621.382.2.3
DOI 10.47049/2226-1893-2022-1-71-79

КЛАСТЕРІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ ЯК ЧАСТКА ПРЕВЕНТИВНОЇ ДІАГНОСТИКИ: ПРОГНОЗУВАННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ ПРОТІКАННЯ

А.Ю. Букарос
к.т.н., доцент
доцент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання
та засоби електрообладнання»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

О.М. Герега
д.т.н., професор,
професор кафедри «Електротехніка
та системи ракетно-артилерійського озброєння»
К.Д. Коньков
викладач кафедри «Електротехніка
та системи ракетно-артилерійського озброєння»
Т.С. Обнявко
к.е.н., викладач кафдри «Електротехніка
та системи ракетно-артилерійського озброєння»
Г.В. Трушков
к.т.н., ст. викладач кафедри «Електротехніка
та системи ракетно-артилерійського озброєння»

Військова академія, Одеса, Україна

Анотація. *Серед завдань, які вирішують фахівці під час експлуатації електронної техніки, зокрема суднової, завжди актуальними є питання діагностики працездатності електронних схем. Це складні та нетривіальні завдання, вирішення яких на задовільному рівні не завжди можливе. У статті пропонується новий алгоритмізований спосіб вирішення такого завдання, а саме той, що ґрунтується на теорії протікання.*

Перколяційна теорія, як відомо, досліджує структуру та властивості зв'язних областей або груп подібних (однотипних) елементів. У статті розглянуто кластери, які утворені на гібридній решітці елементами трансформованої функціональної схеми електричного ланцюга. Асортимент та розподіл кластерів за величиною, тобто кластерна система решітки, визначає її властивості.

Запропоновано спосіб діагностики складних електронних схем, що базується на такому поданні. Спосіб має дві складові. Перша призначена для практичного використання, не вимагає застосування математичного апарату перколяційної теорії, і зводиться до перетворення принципових електронних схем на паралельні та послідовні з'єднання однотипних елементів ланцюга. Це призводить до спонтанного створення кластерної системи елементів і дозволяє знайти елементи, які розташовані поблизу несправного, і, отже, мають знижений ресурс працездатності.

Друга складова призначена для подальшого дослідження схем. Для цього необхідно використовувати перколяційний аналіз переформатованих схем. Такий аналіз дозволяє окрім геометричних параметрів дослідити електропровідність схем, отримати критичний індекс потужності, а також розрахувати фрактальну та хімічну розмірність скелета нескінченного кластера та його лакунарність. Мета подальших досліджень – виявлення залежностей перколяційного типу між структурою та властивостями схем електронних приладів.

Ключові слова: *електронна схема, теорія протікання, кластери елементів, електропровідність, діагностика.*

UDC 51.7:53.072:519.8:621.382.2.3
DOI 10.47049/2226-1893-2022-1-71-79

CLUSTERING ELEMENTS OF ELECTRONIC CIRCUITS AS PART OF PREVENTIVE DIAGNOSIS: PREDICTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT DEGRADATION BY PERCOLATION THEORY

A. Bukaros
Ph.D., Ass. Professor
Department of operation of ship electrical equipment and means of electrical equipment

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

A. Herega
D.Sc., Professor
Department of Electrical Engineering and Systems of Rocket and Artillery Weapons
K. Konkov
Lecturer
Department of Electrical Engineering and Systems of Rocket and Artillery Weapons
T. Obniavko
Ph.D., Lecturer
Department of Electrical Engineering and Systems of Rocket and Artillery Weapons
G. Trushkov
Ph.D., Senior Lecturer
Department of Electrical Engineering and Systems of Rocket and Artillery Weapons

Military Academy, Odessa, Ukraine

Abstract. *Among the problems that are solved by specialists in the operation of electronic equipment, including marine, diagnostic and prevention questions of electronic circuits operability are always relevant. These are complex and non-trivial tasks, the solution of which at a satisfactory level is not always possible. This article proposes another algorithmized way to solve such a problem, namely, a method based on the percolation theory.*

Percolation theory is known to study the structure and properties of the connected regions or groups of similar (same type) elements. The article deals with the clusters formed on the hybrid grid by the elements of the transformed functional scheme of the electric circuit. The assortment and distribution of clusters by size, that is, the cluster system of the lattice determines its properties.

A method for diagnosing complex electronic circuits based on such a concept is proposed. The method has two components. The first is intended for practical use, does not require the use of the mathematical apparatus of the theory, and is reduced to converting basic electronic circuits into parallel and serial connections of the same type of circuit elements. This leads to the spontaneous creation of a cluster system of elements, and allows finding elements that are located close to the faulty one and therefore have a reduced service life.

The second component is intended for further study of the circuits. To do this, it is necessary to use the percolation analysis of reformatted circuits. Such an analysis allows, in addition to geometric parameters, investigating the electrical conductivity of circuits [4], obtaining the critical power index, and also calculating the fractal and chemical dimensions of the skeleton of an infinite cluster and its lacunarity. The purpose of further research is to identify of the percolation type dependencies between the structure and properties of electronic devices circuits.

Keywords: *electronic circuit, percolation theory, clusters of elements, electrical conductivity, diagnostics.*

Вступ. Високий рівень складності сучасної електронної техніки, як відомо, продовжує перманентно підвищуватися. Для цього є об'єктивні передумови: складність поставлених перед технікою завдань вимагає для їх вирішення все більш складних інструментів.

Багато задач сучасної електроніки, зокрема суднової, вирішуються апаратними методами. Для цього застосовують вельми складні електронні схеми, які містять значну кількість елементів. Такий підхід призводить до того, що ефектронна техніка відповідатиме класичному визначенню складної системи – «об'єкт, частини якого можна розглядати як окремі системи, об'єднані в єдине ціле відповідно до визначених принципів або пов'язані між собою заданими відносинами» [1].

Серед задач, котрі вирішують фахівці при експлуатації електронної техніки, окремо стоять питання діагностики і профілактики працездатності, прогнозування можливих відмов електронних схем. Це завжди складні та нетривіальні задачі, вирішення яких на задовільному рівні не завжди можливо. У цій статті пропонується ще один алгоритмізований спосіб вирішення таких задач, а саме метод, який базується на теорії протікання (перколяційній теорії).

Про теорію протікання. Термін «протікання» – вільний переклад англійського слова percolation (просочування), вперше вжитого в 1957 році англійцями С. Бродбентом і Д. Хаммерслі [2] у зв'язку з введенням ними нового класу фізико-математичних задач. Ці задачі природно виникають при розгляді зв'язних областей у середовищі з неоднорідною структурою, що і призвело до назви цієї математичної теорії.

Розглянемо постановку найпростіших задач теорії протікання [3]. Уявимо собі нескінченну просторову або плоску решітку, та назвемо зв'язками відрізки між її найближчими вузлами. Нехай по кожному зв'язку в обидві сторони може «протікати деяка рідина», так що кожен «змочений» вузол миттєво «змочує» все сусідні вузли (далі – без лапок). Це є, так звані, задачі зв'язків.

Різним чином вводячи в умови задач випадкові елементи, можна отримати різні задачі теорії протікання [3]. Припустимо, що кожний зв'язок може перебувати в двох станах: бути розірваним (і тоді він, зрозуміло, не пропускає рідину) або цілим. Нехай імовірність того, що довільний зв'язок цілий, є x, і нехай вона не залежить від стану інших зв'язків. Тоді маємо «ідеальний розчин» цілих і розірваних зв'язків. Концентрація (відносна частка) перших є x, а других $(1- x)$. Причому, що є дуже важливим, картина розподілу цілих і розірваних зв'язків не змінюється з часом.

Після змочування одного вузла решітки можуть виникнути дві різні ситуації: вхідний вузол може змочити або скінченне, або нескінченне число вузлів. В даному контексті «нескінченне» означає мало не всі вузли решітки. Яка з цих двох можливостей реалізується, залежить, звичайно, від частки цілих зв'язків решітки. Однак в силу випадкового розташування цілих і розірваних зв'язків істотним є вибір вхідного вузла, що не є зручним для теорії. Для характеристики всієї системи в цілому слід говорити не про конкретний вхідний вузол, а про імовірність того, що довільний вхідний вузол змочує нескінченне число вузлів [2]. Дуже важливо, що в нескінченній решітці ця імовірність не залежить від конкретної реалізації, тобто від того, яким чином розташовані цілі і розірвані зв'язки. Для заданої решітки така імовірність залежить тільки від x, і ми будемо позначати її $P^{(\mathrm{b})}(x)$ (індекс b вказує на те, що величина відноситься до задачі зв'язків – bond problems). Маючи на увазі граничну поведінку $P^{(\mathrm{b})}(x)$, говорять, що при $x < x_{\mathrm{c}}$ протікання немає, і виникає лише при $x = x_{\mathrm{c}}$.

Існування певного значення порога протікання x_{c}, так само, як і самої функції $P^{(\mathrm{b})}(x)$, пов'язане з тим, що мова йде про нескінченну решітку, для якої все випадкові реалізації розірваних зв'язків із заданим значенням x з точки зору протікання еквівалентні. У цьому ж причина неаналітичності $P^{(\mathrm{b})}(x)$ при $x = x_{\mathrm{c}}$ [3].

Поряд з імовірністю змочити нескінченне число вузлів $P^{(b)}(x)$, можна говорити про імовірність $P_N^{(b)}(x)$ того, що даний вузол змочує принаймні N вузлів, де N – велике, але скінченне число. Імовірність $P_N^{(b)}(x)$, зрозуміло, відмінна від нуля при всіх $0 < x < 1$; імовірність $P^{(b)}(x)$ виходить з $P_N^{(b)}(x)$ граничним переходом при $N \to \infty$.

Розглянемо особливо важливий для нас приклад, в якому виникає задача зв'язків [2; 3]. Нехай проектується електричне коло, що представляє собою квадратну решітку, в вузлах якої розташовані елементи ланцюга. І нехай відомо, що елемент, який вийшов з ладу, провокує вихід з ладу іншого елемента, що знаходиться від нього на відстані r, з імовірністю $f(r)$, де $f(r)$ – функція, яка дуже швидко спадає. Потрібно знайти мінімальний період решітки, при якому один елемент, що вийшов з ладу, здатний зіпсувати лише скінченне число елементів, – тобто, відсутня небезпека «епідемії».

З умови задачі вочевидь, що контактами небліжайших сусідів можна знехтувати, а частка контактів між найближчими елементами, що призводять до псування, дорівнює $f(h)$, де h – період решітки. Якщо таким контактам зіставити цілі зв'язки решітки, а іншим – розірвані, то ми приходимо до задачі зв'язків, причому $x = f(h)$. Тому шуканий мінімальний період $h_{\min}$ визначається рівністю $f(h_{\min}) = x_c$ [2; 3].

Інша основна задача перколяційній теорії – задача вузлів (site problem). У цієї задачі всі зв'язки вважаються цілими, а псуються вузли. Вузли можуть бути перекритими і неперекритими. Перекриті вузли не пропускають рідину, ні в яку сторону, і не можуть бути змочені та не змочують інші вузли. Зрозуміло, що задача вузлів має інше значення критичної концентрації, при якої виникає нескінчений кластер, що забезпечує протікання.

Кластери елементів. В перколяційній теорії показано, що і задачі вузлів, і задачі зв’язків можна сформулювати мовою статистики кластерів [2; 4], не використовуючи уявлення про розтікання рідини з одного вузла.

Розглянемо це на прикладі задачі вузлів (рис. 1). Нехай випадковим чином частку x вузлів решітки пофарбували в чорний колір, а решта вузлів – в білий. Будемо називати пов’язаними будь-які два чорних вузла, що є найближчими сусідами. Назвемо кластером сукупність чорних вузлів, пов’язаних один з одним як безпосередньо, так і за допомогою ланцюжків пов’язаних чорних вузлів.

Мовою кластерів динаміка виникнення протікання при збільшенні x виглядає наступним чином. При малих x всі кластери невеликі. Однак у міру наближення до порогу протікання окремі кластери зливаються і середній розмір кластерів зростає.

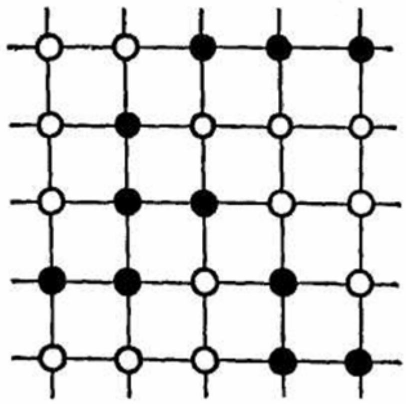

Рис. 1. Кластери у задачі вузлів на квадратній решітці [2]

У точці $x = x_c$ вперше виникає чорний нескінченний кластер. Він нагадує собою випадкову сітку і пронизує весь простір [3]. У «порах» нескінченного кластера розміщуються скінченні ізольовані кластери (рис. 2), де $L(x)$ – характерний розмір таких пор.

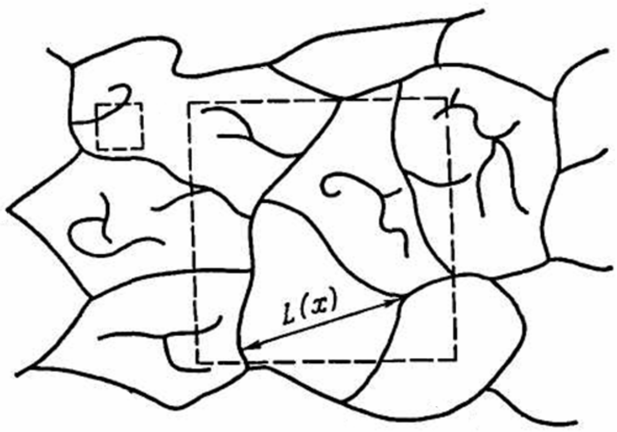

Рис. 2. Схематичне зображення кластерної системи [3]

Поняття нескінченного кластера дозволяє дати інше трактування імовірності $P^{(s)}(x)$ [3]. Так як, тільки вузли нескінченного кластера змочують нескінчене число вузлів, імовірність $P^{(s)}(x)$ дорівнює відношенню числа вузлів, що належать нескінченному кластеру, до повного числа вузлів решітки. Іншими словами, $P^{(s)}(x)$ є щільність нескінченного кластера. Зростання $P^{(s)}(x)$ при видаленні від порога протікання в сторону великих x означає, що нескінченний кластер, поступово приєднуючи скінченні кластери, і з дуже «безтілесного» стає все більш густим. Середній розмір його «пір» поступово зменшується. Відповідно зменшується середнє число тих скінченних кластерів, які залишаються ізольованими.

У задачі зв'язків таким же чином можна говорити про скінченні та не скінченні кластери з цілих зв'язків і пов'язаних ними вузлів. Величина $P^{(b)}(x)$ знову має сенс відносини числа вузлів, що належать нескінченному кластеру, до повного числа вузлів решітки. Слід, однак, мати на увазі, що існує й інше визначення $P^{(b)}(x)$: за щільність нескінченного кластера $P^{(b)}(x)$ приймають відношення числа його зв'язків до повного числа зв'язків решітки [3].

Вельми цікаво, що можна сформулювати задачі вузлів і зв'язків третім еквівалентним способом [2-4]. Дійсно, якщо розглянути решітку скінченого розміру, наприклад, квадрат, на кожній стороні якого міститься m вузлів, і на якій спочатку все вузли білі. Будемо перефарбовувати в чорний колір випадково вибрані вузли, поступово збільшуючи їх частку x. При деякому значенні $x = x_{cl}$ вперше виникне шлях по зв'язаних чорних вузлів з лівого боку квадрата на правий. Назвемо x_{cl} порогом протікання для скінченної решітки [3]. Якщо повторити цю процедуру, то чорні вузли виявляться в інших позиціях і поріг протікання також буде, взагалі кажучи, іншим. Таким чином, x_{cl} є випадкова величина. Багато разів повторюючи описану процедуру, ми можемо обчислити середнє значення $<x_{cl}>$. Поріг протікання, відповідний нескінченної системи, вочевидь, має бути визначеним виразом $x_c = \lim\limits_{l \to \infty} < x_{cl} >$.

Приклад використання теорії протікання у дослідженні електричних схем. Як приклад утворення нескінченного кластеру в задачі зв'язків розглянемо електропровідність великого куба, в якому замість цілих зв'язків стоять резистори з однаковими опорами, і розірваним зв'язкам відповідає нескінченний опір, а напруга підводиться до плоских металевих контактів, які покривають дві протилежні грані куба. Рис. 3 ілюструє таку постановку задачі для двовимірного випадку.

Якщо куб досить великий, то його ефективна електропровідність $\sigma(x)$ відмінна від нуля тільки при $x > x_c^{(b)}$. Згідно чисельним розрахункам, при $x << x - x_c << 1$, $\sigma(x) \sim (x - x_c)^t$, де t – новий критичний індекс. Поведінка $\sigma(x)$ при $x > x_c^{(b)}$ становить інтерес для застосувань, пов'язаних з електропровідністю дискретних чи континуальних невпорядкованих систем. Вочевидь, що $\sigma(x)$, взагалі кажучи, не може бути обчислена на основі інформації про $P^{(b)}(x)$. Для знаходження $\sigma(x)$ потрібно знати не тільки щільність, але і топологічну організацію нескінченного кластера.

Використання теорії протікання у тестуванні електронних схем

Продовжуючи останню мисль попереднього параграфу, маємо припустити, що топологічна організація транзисторних схем найбільш нагадує гібрид решіток із квадратними та трикутними комірками. Дійсно, будь-яка електрична схема завжди може бути приведена до вигляду змішаного (послідовного і паралельного) з’єднання, і в такому вигляді вона являє собою якусь решітку, що складається з квадратних і трикутних комірок (див., наприклад, рис. 4).

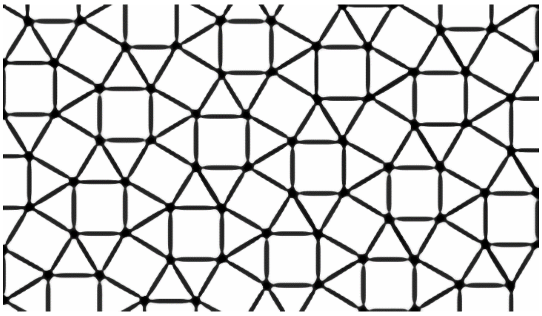

Рис. 4. Гібридна решітка із квадратними та трикутними комірками

У випадку, що досліджується, для визначення критичної концентрації потрібно скористатися результатами досліджень задач вузлів [4]. З цих досліджень маємо: критичне (порогове) значення імовірності, що призводить до виникнення нескінченних кластерів, для трикутної решітки – 50 %, для квадратної – 59 % [2]. При цьому слід мати на увазі, що ця імовірність залежить від процентного складу квадратних та трикутних комірок у решітці (так зване, змішане протікання, графік якого у осях імовірності протікання окремо на кожній з цих решіток має вигляд кривобокої гіперболи).

І, нарешті, розглянемо той аспект перколяційноъ задачі на гібридній решітці, який має відношення до діагностики потенційної працездатності ефектричного кола.

Як зазначалося вище, перколяційна теорія досліджує структуру і властивості зв’язних областей або груп подібних (однотипних) елементів. Такі групи, або кластери різних розмірів утворюються в гібридній решітці елементами трансформованої функціональної схеми електричного кола. Асортимент і розподіл кластерів за величиною, тобто кластерна система решіткм, визначає її властивості.

Для практичних цілей перколяційний аналіз не потрібен. Досить розглянути кластери елементів, які цікавлять нас, і міжкластерні зв’язки.

Це зручно зробити тому, що кластерна система на гібридній решітці відмінно обкреслена, чітко унаочнена і її елементи легко можуть бути знайдені на функціональній схемі.

Несправність елемента будь-якого кластера, зрозуміло, означає, що всі його елементи якийсь час працювали в некондиційних умовах (наприклад, підвищені температури, великі струми, електричне пробиття), і вони, як «найближчі сусіди», постраждали більше, ніж інші частини кола. Тому при проведенні профілактичних робіт їх слід замінити в першу чергу.

Висновки. Запропоновано спосіб діагностики складних електронних схем, який базується на перколяційній теорії. Спосіб має дві складові.

Перша призначена для практичного використання, не потребує застосування математичного апарату теорії, і зводиться до перетворення принципових електронних схем до схем паралельного та послідовного з'єднання однотипових елементів кола на гібридній сітці. Це призводить до спонтанного створення кластерної системи елементів, та дає змогу візуально знайти елементи, які розташовані поблизу від несправного, та мають знижений ресурс працездатності.

Друга складова призначена для подальшого дослідження схем. Для цього потрібно використовувати ретельний перколяційний аналіз переформатованих схем. Такий аналіз дає змогу крім геометричних параметрів дослідити її електропровідність [4], отримати критичний індекс потужності, а також розрахувати фрактальну і хімічну розмірність скелету нескінченного кластера та його лакунарність. Метою подальших досліджень є виявлення залежностей перколяційного типу між структурою та властивостями схем електронних приладів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Філософський енциклопедичний словник. К.: Абрис, 2002. 742 с.*
2. *Sokolov I.M. Dimensionalities and other geometric critical exponents in percolation theory. Sov. Phys. Usp. 1986. Vol. 29. P. 924-945. DOI: https:// doi.org/ 10.1070/PU1986v029n10ABEH003526.*
3. *Shklovskii B.I., Efros A.L. Electronic Properties of Doped Semiconductors. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 1984. 388 p. DOI: https://doi. org/10.1007/978-3-662-02403-4.*
4. *Herega A., Bukaros A., et al. Model of Oscillatory Interaction of Four Scaled Levels Defects in Solids: Self-Organization and Conductivity // AIP Conference Proceedings **2310**, 020123 (2020). DOI: https://doi.org/10.1063/ 5.0034308.*

REFERENCES

1. *Filosofs'kiy yentsiklopedichniy slovnik [Philosophical encyclopedic vocabulary]. (2002). Kiev: Abris [in Ukrainian].*
2. *Sokolov, I.M. (1986). Dimensionalities and other geometric critical exponents in percolation theory. Sov. Phys. Usp., 29, 924-945. DOI: https:// doi.org/10.1070/PU 1986v029n10ABEH003526.*

3. *Shklovskii, B.I., & Efros, A.L. (1984). Electronic Properties of Doped Semiconductors. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 388 p. DOI: https:// doi.org/10.10 07/978-3-662-02403-4.*
4. *Herega, A., Bukaros, A., et al. (2020). Model of Oscillatory Interaction of Four Scaled Levels Defects in Solids: Self-Organization and Conductivity // AIP Conference Proceedings **2310**, 020123 (2020). DOI: https://doi.org/ 10.1063/5.0034308.*

Стаття надійшла до редакції 21.07.2022

Посилання на статтю: Букарос А.Ю., Герега О.М., Коньков К.Д., Обнявко Т.С., Трушков Г.В. Кластерізація елементів електронних схем як частка превентивної діагностики: прогнозування деградації електронного обладнання методами теорії протікання // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2022. № 1(67). С. 71-80. DOI 10.47049/ 2226-1893-2022-1-71-80.

Article received 21.07.2022

Reference a JournalArtic: Bukaros A., Herega A., Konkov K., Obniavko T., Trushkov G. Clustering elements of electronic circuits as part of preventive diagnosis: prediction of electronic equipment degradation by percolation theory // Herald of the Odessa national maritime university. 2022. № 1(67). 71-80. DOI 10.47049/ 2226-1893-2022-1-71-80.