УДК 621.391

М. В. Кайдан, М. І. Бешлей, Т. А. Максимюк, Б. М. Стрихалюк, Р. З. Матвіїв
Національний університет "Львівська політехніка"

ТЕОРІЯ КЕРНЕРА ТА ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ ДЛЯ ПОТОКІВ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

В роботі розглянуто можливість використання теорії Кернера трьох фаз для телекомунікаційних мереж. Описано принципи функціонування транспортних потоків для фаз вільного, синхронізуючого потоків та фази рухомого кластера у системах масового обслуговування з явними втратами, з очікуванням та у системах з повторними викликами. Також розглянуто теорію Кернера за пріоритетного обслуговування та визначено, що кількість фаз значно зростає. Розглянуто можливість дослідження фазових переходів у телекомунікаційних мережах на основі теорії Ландау. Описано параметр порядку, потенціал та коефіцієнт при квадратному члені для дослідження фазових переходів у мережах.

Ключові слова: теорія трьох фаз Кернера, телекомунікаційна мережа, завантаженість, фазові переходи, параметр порядку.

M. Kaidan, M. Beshley, T. Maksymyuk, B. Strykhalyuk, R. Matvyev
Lviv Polytechnic National University

KERNER THEORY AND PHASE TRANSITIONS FOR FLOWS IN TELECOMMUNICATION NETWORKS

On the basis of experimental three-phase traffic theory for the road considered the possibility of use in telecommunication networks. This theory allows us to describe the car's transport flows, for the phases of free, synchronized flow and the phase of the moving jams. Three-phase traffic theory for telecommunication networks is described using queueing theory. We consider queueing theory with losses, waiting and recurring calls. The main features and properties of each phase are demonstrated.

So, in system with recurring calls serviced all load without recurring calls for phase F. For phase S, all load is fully serviced, but part is serviced a second time, but in the J phase, the load is lost.

A comparative analysis has been conducted with the results obtained earlier when investigating the traffic load in an optical transport network. In phase F the transmission time between nodes of the same distance is the same, and without loss. The phases J and S can be distinguished by the existence or non-existence of losses. With a homogeneous network load, the phases can be different for data transfer between nodes and depend on the number of transit nodes between them.

At priority service the number of phases increases were shown. The dependence of the number of phases on priorities has been determined. It is impossible that low priority load in the phase with the best properties was taken into account. It was proposed to use new notations that characterize the phases of various priority flows.

On the basis of Landau theory the possibility of conducting research on phase transitions in telecommunication networks is considered. For conducting such researches for

telecommunication networks have been determined the characteristic of the order parameter. The order parameter can be characterized as the relative losses, waiting and recurring calls.

The potential for different number of order parameters is presented. The coefficient for a square member for the study of phase transitions in networks is described. The results for the order parameter for the second-order phase transitions are presented.

It was emphasized, using multicomponent order parameters as in physics, the possible existence of additional phases.

Key words: three-phase traffic theory, telecommunication networks, load, phase transition, order parameter.

Вступ

Швидкий розвиток телекомунікаційних мереж та широке застосування систем зв’язку зумовили зростання уваги до питань оцінювання якості та надійності роботи таких систем. Завдання аналізу трафіку телекомунікаційних мереж набули значного поширення у вирішенні проблем забезпечення якості провідного та безпровідного зв’язку, безвідмовної роботи інформаційних ресурсів, інформаційного пошуку. Прогнозування завантаження мережі дає змогу забезпечити надійність роботи, раціональне використання ресурсів мережі, ефективне використання обладнання. Інформаційні системи аналізу та прогнозування трафіку довели на практиці свою ефективність, але модернізація телекомунікаційних мереж потребує нових підходів до моделювання, аналізу та прогнозування трафіку телекомунікаційних мереж.

Важливим моментом трафіку є завантаженість мережі. Стан мережі має різні властивості за низької завантаженості мережі та у перевантаженому режимі. Аналогічні дослідження проводяться в автомобільному транспорті. Кернер, аналізуючи перехід вільного потоку до густого, виявив ще один потік і розробив теорію трьох фаз [1, 2]. Очевидно, що ці теорії необхідно розглянути і для телекомунікаційної мережі. Зауважимо, що поведінку мережі доволі ефективно можна прогнозовано охарактеризувати, що дає змогу розробити механізм для оптимального розподілу трафіку та каналів.

Водночас складності спостерігаються у разі переходу однієї фази в іншу. Очевидно, в цьому випадку доцільно розглянути теорію Ландау як ефективний математичний апарат, що використовується і далі розвивається у фізиці. В [3, 4], де розглянуто можливості дослідження мереж, також звернено увагу на цю теорію.

Отже, актуальним є аналіз використання теорії трьох фаз Кернера та розгляд фазових переходів на основі теорії Ландау.

Теорія трьох фаз Кернера для телекомунікаційної мережі

Теорія трьох фаз Кернера описує трафік автомобільних доріг [1, 2, 5]. Очевидно, що необхідно розглянути відповідні аналогії для телекомунікаційних мереж у межах системи масового обслуговування. Отже, розгляд кількості автомашин відповідає навантаженню; потік автотранспорту за одиницю часу q – інтенсивність вхідного потоку λ; час руху автомобіля по автошляху T – час затримки повідомлення на вузлі або витрачений між вузлами; пропускна здатність шляху p (кількість машин, яка може одночасно пройти через поперечний переріз дороги) – інтенсивність обслуговування μ. Графічно досліджувану модель на вузлі подано на рис. 1.

Нехай λ_1, λ_2, λ_3… λ_n – інтенсивність навантажень, які надходять від різних користувачів на один вузол у момент часу t. Згідно з теорією Кернера розглядають три фази (рис. 2):

1. Фаза F – вільний потік (free flow).
2. Фаза S – синхронізуючий потік (synchronized flow).
3. Фаза J – рухомого кластера (moving jams).

Фактично фаза F спостерігається, коли все навантаження обслуговується без затримок, тобто загальна сума навантажень не перевищує можливості вузла в будь-який момент часу t. Якщо ж інтенсивність навантаження, що надходить на вузол, доволі велика, то система переходить у фазу щільного потоку, яка згідно з теорією Кернера розділяється на фазу S та J.

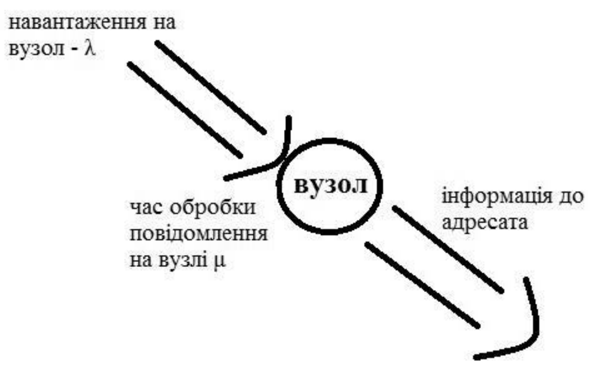

Рис. 1. Принцип досліджуваної моделі

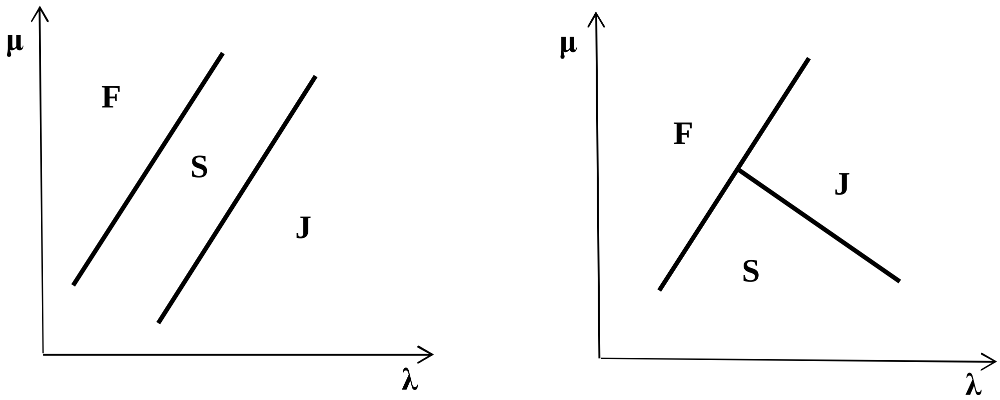

Рис. 2. Діаграми фаз згідно з теорією Кернера

У системі з явними втратами припускаємо, що якщо сумарне навантаження перевищує пропускну здатність вузла, то з певною ймовірністю деякі виклики будуть втрачені, тобто не будуть обслужені. Однозначно, у фазі F втрати не спостерігаються, а у фазі J частина навантаження обслужена, а частина втрачена. Необхідно також зазначити, що у фазі F час затримки не залежить від завантаженості вузлів, тобто тривалість передавання даних між вузлами є постійною величиною

Проміжна фаза S залежить від системи, яку ми використовуємо. Якщо система без очікувань, то фактично відрізнити фазу S від J неможливо. Частина навантаження буде обслужена, а інша втрачена. Якщо використовується система з очікуванням, наприклад, буферів очікування, то у фазі S навантаження буде обслуговуватися без втрат, але частина буде обслужена одразу, а інша чекає незначний проміжок часу, зокрема у буфері.

Водночас у фази J, незважаючи на використання буфера, певна частина навантаження буде втрачатися, причому спричинити втрати може переповнений буфер або очікування, більше від допустимого. Останнє необхідно враховувати під час вибору кількості місць у буфері. Особливою властивістю для фази J є те, що навантаження завжди перебуватиме у черзі, на відміну від фази S, в якій різні навантаження можуть бути в черзі, а інші ні. Це залежить від особливостей обслуговування на вузлі, тоді як для фази J навантаження не може уникнути очікувань в черзі. Для фази F взагалі не має значення, чи є буфери очікування на вузлах, чи ні, оскільки буфер не використовується.

У [6] досліджено оптичну транспортну мережу залежно від завантаженості мережі, можна побачити область, в якій час передавання між вузлами однакової відстані однаковий, а втрат не спостерігається, що відповідає фазі F. Фази J та S вже можна відрізнити за існуванням чи відсутністю втрат. Важливо зазначити, що згідно з [6] за однорідної завантаженості мережі $\rho = \lambda/\mu$ фази можуть бути різними під час передавання даних між вузлами і залежать від кількості транзитних вузлів між ними. Наприклад, можливий такий випадок, що за двох транзитних вузлів передавання даних володітиме властивостями фази F, за чотирьох транзитних фаз S, а більше від шести – фази J.

У системі з повторним викликом у фазі F все навантаження обслужене і повторних викликів немає. Для фази S також все навантаження обслужене повністю, але частина обслужена одразу, а частина обслужена вдруге. У фазі J частина навантаження обслужена одразу, частина обслужена з повторного виклику, а частина втрачається. Причин для втрат у цій системі кілька, зокрема, коли очікування більше від допустимого, внаслідок використання повного ліміту на обмеження кількості повідомлень.

У системі масового обслуговування з пріоритетами наявність фаз залежить від кількості пріоритетів. За двох пріоритетів фазу S необхідно розділити на фази: FS, S та SJ. У фазі FS навантаження з найвищим пріоритетом зберігає властивості вільного потоку, водночас навантаження з нижчим пріоритетом перебуватиме у фазі S. У фазі SJ трафік навантаження з вищим пріоритетом володітиме властивостями фази S, а нижчий пріоритет – фази J. Очевидно, що у фазах F, S та J всі навантаження незалежно від пріоритету будуть володіти однаковими властивостями. Теоретично не можна виключати і фазу FJ, коли навантаження з вищим пріоритетом у фазі F, а з нижчим пріоритетом вже у фазі J. Отже, за двопріоритетного навантаження кількість фаз зросла до шести. За тріпріоритетного навантаження будемо мати десять фаз (F, S, J, FFS, FSS, FSJ, FFJ, FJJ, S, SSJ, SJJ).

Введемо позначення, де літера означає фазу відповідного потоку, тобто перша літера показує, в якій фазі потік з найвищим пріоритетом, а остання літера – в якій фазі потік з найнижчим пріоритетом. У випадку, коли всі потоки в одній фазі, можна обмежитись лише однією літерою.

На цьому етапі відкидається можливість того, що навантаження з нижчим пріоритетом буде у фазі з кращими властивостями. Очевидно, що у такому разі ефективність надання послуг такою мережею низька.

Загальну кількість фаз n залежно від кількості пріоритетів N можна визначити так

$$n = n_f + n_s + n_j;$$

$$n_f = (N+1)\,N/2; \qquad n_s = N; \qquad n_j = 1. \tag{1}$$

де індексами f, s, j – позначають кількість фаз, у яких навантаження з вищим пріоритетом у фазах F, S та J, відповідно.

Математичний підхід до аналізу фазових переходів за допомогою теорії Ландау

У разі зміни завантаженості мережі очевидно, що спостерігаються різні фазові переходи. Для такого аналізу запропоновано використовувати теорію Ландау [7]. На цьому етапі досліджень будемо вважати, що зміна характеристик у мережі відповідає фазовим переходам другого роду.

Для проведення зазначених досліджень вводиться поняття параметра порядку. Параметр порядку η для досліджуваної мережі можна характеризувати як відношення кількості викликів, які втрачені або є в черзі, або повторно викликались, до загальної кількості викликів за певний проміжок часу.

Отже, параметр порядку η визначається так, що дорівнює нулю для однієї фази і більший від нуля для іншої фази (рис. 3), де ρ_0 – критичне значення навантаження і є точкою переходу між фазами. У зв’язку з неперервністю фазового переходу в самій точці переходу вважають, що $\eta = 0$ і монотонно збільшується з віддаленням від точки.

Для проведення відповідних досліджень у теорії фазових переходів вводять потенціал Φ [7], який визначає стан системи. В мережах потенціал Φ залежить від завантаженості ρ та інших параметрів, наприклад X, які впливають на стан системи. В області точки фазового переходу потенціал Φ повинен характеризуватись також значенням параметра порядку η і внаслідок його малого значення в цій області може бути розкладений в ряд. Відповідне розкладення справедливе, за винятком вузького інтервалу біля самої точки фазового переходу, де велика роль флуктуації параметра порядку [7]. Припускають, що перебувають за межами цього інтервалу, і записують розклад у вигляді:

$$\Phi = \Phi_0 + r\eta^2 + v\eta^3 + u\eta^4 + \ldots \tag{2}$$

де Φ_0 – значення потенціалу в початковій точці, r, v, u – деякі параметри системи, які залежать від ρ та X.

Рівновагу значення параметра порядку визначають із умов мінімуму Φ як функції η та знаходять із двох співвідношень:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = 0\,. \qquad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} > 0\,. \qquad (4)$$

З (3) зрозуміло, чому в розкладі (2) немає лінійного η члена.

Загалом, для того щоб в фазі $\rho<\rho_0$ значення η дорівнювало нулю, необхідно, щоб $r>0$. З іншого боку,

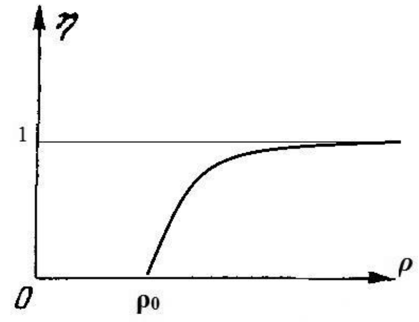

Рис. 3. Залежність параметра порядку від завантаженості вузла

для появи відмінного від нуля η, якщо $\rho<\rho_0$, необхідно, щоб $r<0$. Відповідно, в самій точці переходу ρ_0 параметр $r=0$. Отже, припускають, що коефіцієнт при квадратному члені в розкладенні Φ в області ρ_0 лінійної функції [7]:

$$r = r'_0(\rho_0 - \rho) + \ldots \qquad (5)$$

Далі можна показати, що при v=0 [7]

$$\eta = 0, \qquad \text{для } \rho > \rho_0$$
$$\eta = (-r / 2u)^{1/2} \sim (\rho_0 - \rho)^{1/2}, \qquad \text{для } \rho < \rho_0. \qquad (6)$$

Подані співвідношення демонструють залежність параметра порядку від завантаженості в області, фазового переходу другого роду і відповідають (рис. 3). Випадок, коли $v \neq 0$, відповідає фазовому переходу першого роду [7].

Ландау показав в загальному вигляді, коли теоретичний опис (1) не може привести до фазового переходу другого роду. Зокрема, наявність кубічних членів у потенціалі неминуче приводить до фазового переходу першого роду.

Отримані результати стосуються фазового переходу, який характеризується однокомпонентним параметром порядку. Загалом з огляду на попередній параграф у фазах параметри порядку можуть бути багатокомпонентною величиною $\eta = \{\eta_1, \eta_2, \ldots\}$, особливо це стосується фази J. Саме параметр порядку η характеризує відносну величину втрат, перебування в черзі або повторні виклики і т. д. Здебільшого багатокомпонентні параметри порядку будуть використовуватися у фазовому переході F→J.

Для двокомпонентних параметрів потенціал матиме вигляд

$$\Phi = r_1\eta_1^2 + r_2\eta_2^2 + r_3\eta_1\eta_2 + u_1\eta_1^4 + u_2\eta_2^4 + u_3\eta_1^2\eta_2^2 + u_4\eta_1^3\eta_2 + u_5\eta_1\eta_2^3. \qquad (7)$$

Для трикомпонентних параметрів потенціал можна подати як

$$\Phi = r_1\eta_1^2 + r_2\eta_2^2 + r_3\eta_3^2 + r_4\eta_1\eta_2 + r_4\eta_1\eta_3 + r_5\eta_2\eta_3 + u_1\eta_1^4 + u_2\eta_2^4 + u_3\eta_3^4 +$$
$$+ u_4\eta_1^2\eta_2^2 + u_5\eta_1^2\eta_3^2 + u_6\eta_2^2\eta_3^2 + u_7\eta_1^3\eta_2 + u_8\eta_1\eta_2^3 + u_9\eta_1^3\eta_3 + u_{10}\eta_1\eta_3^3 +$$
$$+ u_{11}\eta_2^3\eta_3 + u_{12}\eta_2\eta_3^3. \qquad (8)$$

Зазначимо, що у фізиці у системах з багатокомпонентними параметрами порядку виявлено новий тип фазових переходів [7–9]. Отже, у нашому випадку можливе виникнення ще додаткової фази.

Висновки

У роботі на основі експериментальної теорії Кернера трьох фаз для автошляху розглянуто можливість використання її за допомогою системи масового обслуговування в телекомунікаційних мережах. Ця теорія дала змогу здійснити опис принципів функціонування транспортних потоків для фаз вільного, синхронізуючого потоків та фази рухомого кластера у системах масового обслуговування з явними втратами, з очікуванням та у системах з повторними викликами.

Показано, що у разі використання теорії Кернера за пріоритетного обслуговування кількість фаз значно зростає. В роботі також вказано на недопустимість того, що навантаження з нижчим пріоритетом буде у фазі з кращими властивостями.

На основі теорії Ландау розглянуто можливість дослідження фазових переходів у телекомунікаційних мережах. Описано параметр порядку, потенціал та коефіцієнт при квадратному члені для дослідження фазових переходів у мережах. Вказано зміст параметра порядку, який може характеризувати втрати, існування черги та кількість повторних викликів.

1. Kerner B. S. Introduction to modern traffic flow theory and control. – Berlin: Springer, 2009. – 265 p. 2. Kerner B. S. The physics of traffic. – Berlin: Springer, 2004 – 682 p. 3. Головач Ю., Олємской О., К. фон Фербер, Головач Т., Мриглод О., Олємской І., Пальчиков В. Складні мережі // Журнал фізичних досліджень. – 2006. – Т. 10, № 4. – С. 247–289. 4. Снарский А. А., Ландэ Д. В. Моделирование сложных сетей: учеб. пособ. – К.: Инжиниринг, 2015. – 212 с. 5. Кленов С. Л. Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке – новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий. – М.: Труды МФТИ. – 2010. – Том 2, № 4. – С. 75–89. 6. Климаш М. М., Кайдан М. В. Ефективність протоколів оптичної комутації блоків в транспортній мережі // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2016. – № 3 (43). – С. 5–12. 7. Изюмов Ю. А., Сыромятников В. Н. Фазовые переходы и симметрия кристаллов. – М.: Наука, 1984. – 245 с. 8. Дзялошинский И. Е. Термодинамическая теория "слабого" ферромагнетизма антиферромагнетиков // ЖЭТФ – Т.32, № 6. – 1957. – С. 1547–1562. 9. Dvořák V. Improper ferroelectrics // Ferroelectrics. – V. 7, N 1. – 1974

References

1. Kerner B. S. Introduction to modern traffic flow theory and control. – Berlin: Springer, 2009. – 265 p. 2. Kerner B. S. The physics of traffic. – Berlin: Springer, 2004. – 682 p. 3. Golovach Yu., Olmeskoy O., K. von Ferber, T. Golovach, O. Mryglod, Olemskoy I., Palchikov V. Complex Networks // Journal of Physical Research. – 2006. – T.10, No. 4. – P. 247–289. 4. Snarsky A. A., Lande D. V. Modeling of complex networks: a tutorial. – K.: Engineering, 2015. – 212 p. 5 Klenov S. L. Three-phase traffic theory in the transport stream – a new theoretical basis for intelligent transport technologies, Moscow: Proceedings of MIPT. – 2010. – Vol. 2, No. 4. – P.75–89. 6. Klymash M. Kaidan M. Effectiveness of protocols optical burst switching in the transport network // Science notes of Ukrainian scientific-investigation Institute of Connection. – 2016. – № 3 (43). – P. 5–12. 7. Izyumov Yu. A., Syromyatnikov V. N. Phase transitions and symmetry of crystals: мonograph. – M.: Science, 1984. – 245 p. 8. Dzialoshinskii I. E. Thermodynamic theory of "weak" ferromagnetism in antiferromagnetic substances // Sov. Phys. JETP – Vol. 5(6) – 1957 – P. 1259–1272. 9. Dvořák V. Improper ferroelectrics // Ferroelectrics. – Vol. 7, No. 1. – 1974.