Висновки. Застосування запропонованої методики дозволяє визначити за паспорними даними СД параметри процесу енергоспоживання та енерговикористання для номінального режиму, робочі параметри і параметри схеми заміщення.

Результати моделювання на ЕОМ в середовищі MATLAB залежностей ККД і робочих параметрів СД промислової серії СД2 показали достатньо високу сходимість результатів розрахунків і експериментальних даних, які надають виробники.

Література

1. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго – и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2008.- 208 с.
2. Закладний О.О., Закладний О.М. Програмне забезпечення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2011. №2. С. 102-108.
3. Закладний О.М, Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: навч. посіб. - К.: "Кондор", 2005. - 408с.
4. Праховник А.В., Закладний О.М., Закладний О.О. Діагностування енергоефективності електромеханічних систем як інструмент енергоменеджменту // ВІСНИК Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2011, - Вип. 21. С. 121-128.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
6. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. и др. Управление качеством электроэнергии / под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 320 с.
7. Кибартас В.В., Кибартене Ю.В. Метод идентификации параметров обмоток синхронных электродвигателей различных конструктивных особенностей. Вестник Павлодарского университета,- Павлодар,учреждение «Павлодарский университет», 2004 г. № 1 с. 163-168.

УДК 621.314.222.600

М. А. ДЕНИСЕНКО, І. В. ПРИТИСКАЧ, О. П. АВРАМЕНКО

ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗА ЕКОНОМІЧНИМ КРИТЕРІЄМ

Н. А. ДЕНИСЕНКО, И. В. ПРИТИСКАЧ, О. П. АВРАМЕНКО

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО ЭКОНОМИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

M.A. DENYSENKO, I.V. PRYTYSKACH, O.P. AVRAMENKO

SELECTION OF ELECTRIC SUPPLY SYSTEM ELEMENTS USING ECONOMIC CRITERIA

Анотація: Для техніко-економічного порівняння варіантів в електропостачальних системах найбільш застосовний економічний показник – дисконтовані витрати, а для вибору окремих елементів електропостачальних систем – питомі дисконтовані витрати. В статті наведена методика застосування стохастичної моделі вибору елементів електропостачальних систем за даним критерієм та оцінка її чутливості до зміни норми дисконту, тарифу на електроенергію та капітальних вкладень на прикладі вибору трансформаторів. Дана методика реалізована в програмі для ЕОМ, яка дозволяє отримати криві оптимальних за критерієм економічності параметрів розподілу електричних навантажень або зони економічних інтервалів цих параметрів.

Ключові слова: електропостачальна система, трансформатор, дисконтовані витрати, норма дисконту, стохастична модель вибору.

Аннотация: Для технико-экономического сравнения вариантов в системах электроснабжения наиболее применим экономический показатель – дисконтированные затраты, а для выбора отдельных элементов систем электроснабжения – удельные дисконтированные затраты. В статье приведена методика применения стохастической модели выбора элементов систем электроснабжения по данному критерию и оценка ее чувствительности к изменению нормы дисконта, тарифа на электроэнергию и капитальных вложений на примере выбора трансформаторов. Данная методика реализована в программе для ЭВМ, которая позволяет получить кривые оптимальных по критерию экономичности параметров распределения электрических нагрузок или зоны экономических интервалов этих параметров.

Ключевые слова: система электроснабжения, трансформатор, дисконтированные затраты, норма дисконта, стохастическая модель выбора.

Abstract: For technical and economic comparison of options in electric supply systems the most applicable economic indicator is discounted costs and for selection of individual elements of electric supply systems – specific discounted costs. The article describes application methods of stochastic selection model for electric supply systems elements on this criterion and evaluation of its sensitivity to changes in the discount rate, electricity tariff and capital investment on example transformers selection. This technique is implemented in a computer program, which allows you to get optimal curves on the criterion of economic efficiency of electrical load distribution parameters or economic intervals zone of these parameters.

Keywords: electric supply system, transformer, discounted costs, discount rate, stochastic selection model.

1 Загальні відомості

Показники економічності мають випадковий характер і тому мають оцінюватись стохастично, тобто із застосуванням теорії імовірностей і математичної статистики.

Для техніко-економічного порівняння варіантів в електропостачальних системах (ЕПС) найбільш застосовний економічний показник – дисконтовані витрати, а для вибору окремих елементів ЕПС – питомі дисконтовані витрати, які використано в даній роботі. Стохастичну модель вибору та оптимізації в ЕПС наведено в [1, 2]. Для її застосування в інженерній практиці рекомендувались програми для ЕОМ, криві оптимальних за критерієм економічності параметрів розподілу електричних навантажень або зони економічних інтервалів цих параметрів.

На даний час методика застосування цієї моделі, в основному, застаріла через зміну методики оцінки економічних показників, ціни на обладнання і електроенергію тощо. Тому виникає необхідність у проведенні додаткових досліджень і розробці відповідних рекомендацій для інженерної практики.

2 Постановка задачі досліджень

Задачі досліджень:

– розробити програму і підпрограми для ЕОМ для вибору елементів ЕПС за економічними критеріями, яку можна використовувати в інженерній практиці;

– оцінити чутливість стохастичної моделі вибору елементів ЕПС за економічним критерієм.

– побудувати криві оптимальних за критерієм економічності параметрів розподілу електричних навантажень або зони економічних інтервалів цих параметрів для силових масляних трансформаторів з використанням сучасних методик та імовірнісних вихідних даних.

Мета досліджень: розробка методики вибору елементів електропостачальних систем за економічними критеріями в сучасних умовах, алгоритмів і програм, а також їх реалізація стосовно вибору силових масляних трансформаторів.

3 Розв'язання задачі досліджень

3.1 Дисконтовані витрати

В ЕПС дуже часто виконують проектні роботи, за яких кількість переданої електроенергії вважається постійною величиною. При цьому показником економічності можуть бути загальні дисконтовані витрати (ДВ) без урахування амортизаційних відрахувань, що для динамічних задач з урахуванням збитку від перерви в електропостачанні описуються виразом, тис. грн. [3]:

$$\text{ДВ} = \sum_{t=1}^{T} \text{К}_t + \left(\text{В}_{\text{о}.t} + \text{В}_{\Delta WP_{\Sigma}.t} + \text{В}_{\text{кр}.t} - \text{Л}_t + \text{З}_t\right) / \left(1 + e_{\text{д}}\right)^t, \quad (1)$$

де К_t – капітальні вкладання в ЕПС у t-му році на її спорудження або реконструкцію, тис. грн.;

$Л_t$ – ліквідна (залишкова) вартість демонтованого устаткування в *t*-му році, термін служби якого не минув до зміни основних фондів, тис. грн;

T – розрахунковий період, роки;

$В_{о.t}$ – сумарні витрати на експлуатацію ЕПС у *t*-му році, тис. грн;

$В_{\Delta WP_{\Sigma}.t}$ – вартість сумарних втрат електроенергії в *t*-му році, тис. грн;

$В_{кр.t}$ – плата відсотків за кредит в *t*-му році, тис. грн;

$З_t$ – річний збиток від перерви в електропостачанні споживача в *t*-му році, тис. грн;

$e_д$ – норма дисконту.

Величина К містить у собі вартість елементів ЕПС, їх будівельної частини і монтажу. Величину $В_о$ (річні витрати на технічне обслуговування і ремонт) розраховують за виразом

$$В_о = В_{о.л} + В_{о.у} = (\alpha_л / 100)К_л + (\alpha_у / 100)К_у, \quad (2)$$

де $К_л$, $К_у$ – капітальні вкладення в лінії електропередачі й устаткування відповідно;

$\alpha_л$, $\alpha_у$ – норми річних витрат на експлуатацію ліній і устаткування відповідно.

Вартість $В_{\Delta WP_{\Sigma}}$ знаходять також як суму двох складників:

$$В_{\Delta WP_{\Sigma}} = В_{\Delta WP} + В'_{\Delta WP}, \quad (3)$$

де $В_{\Delta WP}$ – вартість річних втрат електроенергії ΔWP, що не залежать від ЕН і які називаються постійними втратами або втратами неробочого ходу;

$В'_{\Delta WP}$ – вартість річних втрат електроенергії, що залежать від ЕН і називаються змінними або навантажувальними втратами.

Величини $В_{\Delta WP}$ і $В'_{\Delta WP}$ розраховують за виразами:

$$В_{\Delta WP} = c_0 \Delta WP = 3c_0 I^2 r T_р; \quad (4)$$

$$В'_{\Delta WP} = c'_0 \Delta WP = c'_0 P_{н.х} T_в, \quad (5)$$

де c_0, c'_0 – вартості 1 кВт·год втрат неробочого ходу і навантажувальних відповідно;

I – навантажувальний струм; *r* – активний опір;

$P_{н.х}$ – втрати потужності, що не залежать від ЕН;

$T_р$ – час роботи під навантаженням.

Щорічний збиток З через аварійні ($З_в$) і планові ($З_п$) перерви в електропостачанні, а також ліквідацію відмов ($З_{л.в}$), визначають сумою тис. грн,

$$З = З_{л.в} + З_в + З_п, \quad (6)$$

Де

$$З_{л.в} = \omega_в m; \quad (7)$$

$$З_в = \sqrt{3} UI \cos\varphi \, \omega_в T_в \varepsilon_в з_{о.в}; \quad (8)$$

$$З_п = \sqrt{3} UI \cos\varphi \, \omega_п T_п \varepsilon_п з_{о.п}. \quad (9)$$

У формулах (7)–(9): $\omega_в$ – параметр потоку відмов, 1/рік; $\omega_п$ – параметр планових простоїв, 1/рік; *m* – вартість ліквідації однієї відмови, тис. грн; *U* – напруга, кВ; *I* – струм, А; cosφ – коефіцієнт потужності навантаження; $\varepsilon_в$, $\varepsilon_п$ – коефіцієнти вимушеного та планового обмежень ЕН споживача для виконання післяаварійного і планових ремонтів відповідно; $З_{о.в}$, $З_{о.п}$ – питомі річні збитки споживача від аварійних (раптових) і планових відмикань

відповідно, тис. грн/кВт·год; $T_в$, $T_п$ – середні тривалості вимушеного простою і планового ремонту відповідно, год.

Величина $e_д$ для країн з розвиненою ринковою економікою становить 0,15–0,2.

Для статичних задач за *T* = 1 вираз (1) набуває вигляду

$$ДВ = (К - Л) + (В_о + В_{\Delta WP} + З) / e_д. \quad (10)$$

Для знову споруджуваних ЕПС або її ділянок $Л_t$ і Л у формулах (1) і (10) припускають рівними нулю.

Аналіз виразів (1)–(10) показує, що ДВ мають випадковий характер, що визначається випадковим характером впливових змінних, насамперед навантажувального струму *I*. Випадковий характер мають також інші змінні: К, *r*, $T_р$, $c_0, c_0', \omega_в, \omega_п, m, U, \cos\varphi, T_в, T_п, з_{о.в}, з_{о.п}$. Оскільки натепер випадковий характер цих змінних вивчено недостатньо, надалі враховується випадковий характер тільки навантажувального струму. Інші змінні враховуються їх постійними параметрами (наприклад, математичними очікуваннями $\bar{m}$, $\overline{\cos\varphi}$, $\overline{T_в}$, $\overline{T_п}$, $\overline{з}_{о.в}$, $\overline{з}_{о.п}$).

Якщо підставити вирази (3)–(9) у рівняння (10) і ввести допоміжні величини *a, b, c*, одержимо вираз для ДВ у вигляді функції струму:

$$ДВ = aI^2 + bI + c, \tag{11}$$

у якому величини *a, b, c* визначають за формулами [2]:

$$a = \frac{3c_0 r T_р}{e_д};$$

$$b = \frac{\sqrt{3}U\overline{\cos\varphi}(\overline{\omega_в}\overline{T_в}\overline{\varepsilon_в}\overline{з_{о.в}} + \overline{\omega_п}\overline{T_п}\overline{\varepsilon_п}\overline{з_{о.п}})}{e_д};$$

$$c = К + \frac{\overline{\omega_в} m}{e_д} + \frac{\alpha_л К_л + \alpha_у К_у}{100\, e_д} + \frac{c_0' P_{н.х.} T_в}{e_д}.$$

3.2 Питомі дисконтовані витрати

Для вибору оптимальних за критерієм економічності параметрів окремих елементів або віток ЕПС можна використовувати питомі ДВ, надалі $ДВ_п$, тобто ДВ за одиничної переданої потужності (тис.грн/кВ·А) або одиничних навантажувального струму і довжини провідника (тис.грн/А·км). Величина $ДВ_п$, як і ДВ, випадкова.

Вираз для $ДВ_п$ у першому випадку одержуємо розділом рівняння (11) на повну потужність $S = \sqrt{3}U|I|$:

$$ДВ_п = \frac{a_п}{|I|} + b_п|I| + c_п. \tag{12}$$

У виразі (12) коефіцієнти $a_п$, $b_п$, $c_п$ визначають за формулами:

$$a_п = \frac{1}{\sqrt{3}U}\left[К + \frac{\bar{\omega}_в m + (\alpha_л К_л + \alpha_у К_у)/100 + c_0' P_{н.х} T_р}{e_д}\right]; \tag{13}$$

$$b_п = \frac{\sqrt{3}c_0 r T_р}{e_д U}; \tag{14}$$

$$c_п = \frac{\overline{\cos\varphi}(\bar{\omega}_в \bar{T}_в \varepsilon_в \bar{з}_{о.в} + \bar{\omega}_п \bar{T}_п \varepsilon_п \bar{з}_{о.п})}{e_д}. \tag{15}$$

Під час вибору одиничних елементів або вітки ЕПС оцінка сумарного збитку в ДВ найчастіше залишається невизначеною, оскільки ступінь безперебійності електропостачання визначається сукупністю елементів і віток або ж усієї ЕПС. У таких випадках величини $З_t$ і З у рівняннях (1) і (10) не враховують; коефіцієнт $c_п$ і добуток $\bar{\omega}_в m$ в виразі (13) для коефіцієнта $a_п$ дорівнюють нулю.

3.3 Стохастична модель вибору оптимального варіанта за критерієм економічності

Стохастична мінімізація дисконтованих витрат математично може бути формалізована у такий спосіб: для кожного *i*-го варіанта з $i \in [1, n]$ розраховують імовірність

$$p_i = p\left[ДВ_{п.i} = \underset{\nu=1,\,n}{\text{Min}}\{ДВ_{п.\nu}\}\right], \tag{16}$$

а економічно оптимальний *j*-й варіант знаходять потім за умови

$$p_j = \underset{i=\overline{1,n}}{\text{Max}}\{p_i\}. \quad (17)$$

Максимізацію імовірності того, що $ДВ_п$ оптимального варіанта менші, ніж за всіма іншими порівнюваними варіантами, можна використовувати як принцип вибору параметрів окремих елементів чи ланок (послідовно увімкнених елементів) ЕПС.

Для однієї заданої ланки, навантажувальний струм I якої є нормально розподіленою випадковою величиною, можна визначити такі пари параметрів розподілу струму $\bar{I}$ і $v[I]$, за яких $ДВ_п$ чи електричні втрати цієї ланки будуть мінімальними. Таким чином, можна одержати економічно оптимальні параметри розподілу ЕН. При цьому окремі пари значень $\bar{I}$ і $v[I]$ розглядаються як варіанти і для кожної пари параметрів розподілу навантажувального струму розраховують залежні від них імовірності за рівняннями (16) чи (17). Ці ймовірності можна наочно зобразити у вигляді склепінчастої поверхні над площиною $\bar{I} - v[I]$. З'єднуючи на цій поверхні відносні максимуми $p(ДВ = \text{Min}) = \text{Max}$ кривої лінії і проектуючи її на площину $\bar{I} - v[I]$, одержують криву $\bar{I} = \varphi\{v[I]\}$, кожна точка якої відповідає парі економічно оптимальних параметрів $\bar{I}, v[I]$, що забезпечують виконання умови (17). Ці криві називають кривими економічно оптимальних параметрів розподілу навантажувального струму.

Для розрахунку і побудови таких кривих замість величини $\bar{I}$ можна використовувати величину $\bar{I} / I_{ном}$, де $I_{ном}$ – номінальний струм елемента ЕПС.

Для практичного використання можна побудувати також зони економічних інтервалів параметрів розподілу ЕН.

Мінімізацію питомих дисконтованих витрат можна здійснити з використанням як математичного апарату (розрахунок імовірності p_i здійснюють за допомогою інтегралів Рімана або Стілтьєса), так і імітаційного моделювання (ІМ)[2].

3.4 Мінімізація питомих дисконтованих витрат для силових масляних трансформаторів з використанням імітаційного моделювання

3.4.1 Розрахунок коефіцієнтів питомих дисконтованих витрат

Технічні характеристики трансформаторів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики розподільних трансформаторів

№ з/п	Тип транформатора	Потужність, кВ·А	Напруга, кВ		Напруга КЗ, %	Втрати, кВт		Активний опір, кОм	Вага, кг
			ВН	НН		н.х	к.з		
1	ТМ-100	100	6, 10	0,4	4,5	0,305	1,97	0,01970	495
2	ТМ-160	160	6, 10	0,4	4,5	0,41	2,65	0,01035	725
3	ТМ-250	250	6, 10	0,4	4,5	0,55	3,7	0,00592	990
4	ТМ-400	400	6, 10	0,4	4,5	0,83	5,5	0,00344	1285
5	ТМ-630	630	6, 10	0,4	5,5	1,05	7,6	0,00191	1795
6	ТМ-1000	1000	6, 10	0,4	5,5	1,55	10,8	0,00108	2920
7	ТМ-1600	1600	6, 10	0,4	6,00	2,05	16	0,00063	4750
8	ТМ-2500	2500	6, 10	0,4	6,00	2,8	24	0,00038	6980

Вартість трансформаторів та вартість робіт з їх монтажу на 2010 рік наведено в таблиці 2, інші вихідні дані – в таблиці 3.

Таблиця 2 – Вартість трансформаторів та робіт з їх монтажу

№ з/п	Тип трансформатора	Ціна, тис.грн.	Монтаж, тис.грн.
1	ТМ-100	26,13906	4,96605
2	ТМ-160	32,86544	5,21952
3	ТМ-250	42,125	5,38973
4	ТМ-400	55,32246	5,6734
5	ТМ-630	84,57451	6,24074
6	ТМ-1000	123,44581	7,94276
7	ТМ-1600	220,31968	10,77946
8	ТМ-2500	365,81968	13,89983

Таблиця 3 – Параметри для розрахунку коефіцієнтів $a_{\text{п}}$, $в_{\text{п}}$

$e_{\text{д}}$	0,1
$U_{\text{ВН}}$	10 кВ
$c_0^{'}$	0,000483 тис.грн./кВт·год
c_0	0,0006896 тис.грн./кВт·год
$T_{\text{р}}$	8760 год
$\alpha_{\text{у}}$	3%

За даними таблиць 1–3 за виразами (13), (14) одержуємо коефіцієнти $a_{\text{п}}$, $b_{\text{п}}$ (таблиця 4).

3.4.2 Розрахунок залежностей функції $ДВ_{\text{п}}$ від значення струму I

Для прикладу розрахуємо значення мінімального $I_{\text{min.100}}$ і максимального $I_{\text{max.100}}$ струмів, середнього струму $\bar{I}_{100}$, а також значення максимальних $ДВ_{\text{п.max.100}}$ і мінімальних $ДВ_{\text{п.min.100}}$ питомих дисконтованих витрат для трансформатора ТМ-100, якщо коефіцієнт варіації струму $\nu\left[I\right]$ дорівнює 0,2, приймаючи, що ефективне значення струму $I_{\text{е.100}}$ дорівнює номінальному струму $I_{\text{н.100}}$:

Таблиця 4 – Розраховані коефіцієнти $a_{\text{п}}$, $в_{\text{п}}$ для трансформаторів

№ з/п	Тип трансформатора	$a_{\text{п}}$, тис.грн./кВ	$в_{\text{п}}$, тис.грн./А^{2}кВ
1	ТМ-100	2,99322	0,20612
2	ТМ-160	3,76906	0,10831
3	ТМ-250	4,81566	0,06194
4	ТМ-400	6,50617	0,03597
5	ТМ-630	9,27156	0,02004
6	ТМ-1000	13,50804	0,01130
7	ТМ-1600	22,16343	0,00654
8	ТМ-2500	35,09522	0,00402

$$I_{н_{100}} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U};\ I_{н_{100}} = \frac{100}{\sqrt{3}\times 10} = 5{,}774\ \text{А};$$

$$\bar{I}_{100} = \frac{I_{e_{100}}}{1+\nu^2[I]} = \frac{I_{н_{100}}}{1+\nu^2[I]};\ \bar{I}_{100} = \frac{5{,}774}{1+0{,}2^2} = 5{,}551\ \text{А};$$

$$I_{100} = \bar{I}_{100}(1 \pm 3\nu[I]);\ I_{100} = 5{,}551(1 \pm 3\cdot 0{,}2) = (5{,}551 \pm 3{,}331)\ \text{А};$$

$$I_{\min.100} = 2{,}220\ \text{А};\ I_{\max.100} = 8{,}882\ \text{А};$$

$$\text{ДВ}_{\text{п.max1.100}} = \frac{a_{\text{п}}}{I_{\min.100}} + в_{\text{п}} I_{\min.};\qquad \text{ДВ}_{\text{пmax1.100}} = \frac{2{,}993}{2{,}220} + 0{,}206\cdot 2{,}220 = 1{,}806\ \text{тис.грн};$$

$$\text{ДВ}_{\text{п.max2.100}} = \frac{a_{\text{п}}}{I_{\max.100}} + в_{\text{п}} I_{\max.100};\qquad \text{ДВ}_{\text{п.max2.100}} = \frac{2{,}993}{8{,}882} + 0{,}206\cdot 8{,}882 = 2{,}168\ \text{тис.грн.}$$

$I_{\min.100} = \sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{в_{\text{п}}}};\ I_{\min.100} = \sqrt{\frac{2{,}993}{0{,}206}} = 3{,}811\ \text{А}$ – струм, за якого $\text{ДВ}_{\text{п}}$ будуть мінімальні.

Для інших трансформаторів розрахунки виконуються аналогічно. Дані розрахунків наведено в таблиці 5.

Графіки залежності $\text{ДВ}_{\text{п}}$ від струму, які визначають область їх зміни, для всіх розподільних трансформаторів за умов $\nu[I] = 0,2$ і $I_{\text{е}} = I_{\text{н}}$ побудовано на рисунку 1.

Аналогічно розраховують область інтегрування питомих дисконтованих витрат для трансформаторів за інших значень коефіцієнта $\nu[I]$.

Таблиця 5 – Дані для побудови функції розподілу питомих дисконтованих витрат

№ з/п	Тип транформатора	$I_{\text{н}}$	$\bar{I}$	$I_{\max1}$	$I_{\max2}$	$\text{ДВ}_{\text{п.max1}}$	$\text{ДВ}_{\text{п.max2}}$	$I_{\min}$
1	ТМ-100	5,7735	5,5514	2,2206	8,8823	1,8057	2,1678	3,8107
2	ТМ-160	9,2376	8,8823	3,5529	14,2117	1,4456	1,8045	5,8991
3	ТМ-250	14,4338	13,8786	5,5514	22,2058	1,2113	1,5923	8,8173
4	ТМ-400	23,0940	22,2058	8,8823	35,5292	1,0520	1,4610	13,4496
5	ТМ-630	36,3731	34,9741	13,9896	55,9586	0,9430	1,2868	21,5119
6	ТМ-1000	57,7350	55,5144	22,2058	88,8231	0,8592	1,1558	34,5743
7	ТМ-1600	92,3760	88,8231	35,5292	142,1170	0,8562	1,0853	58,2167
8	ТМ-2500	144,3376	138,7861	55,5144	222,0578	0,8552	1,0502	93,4603

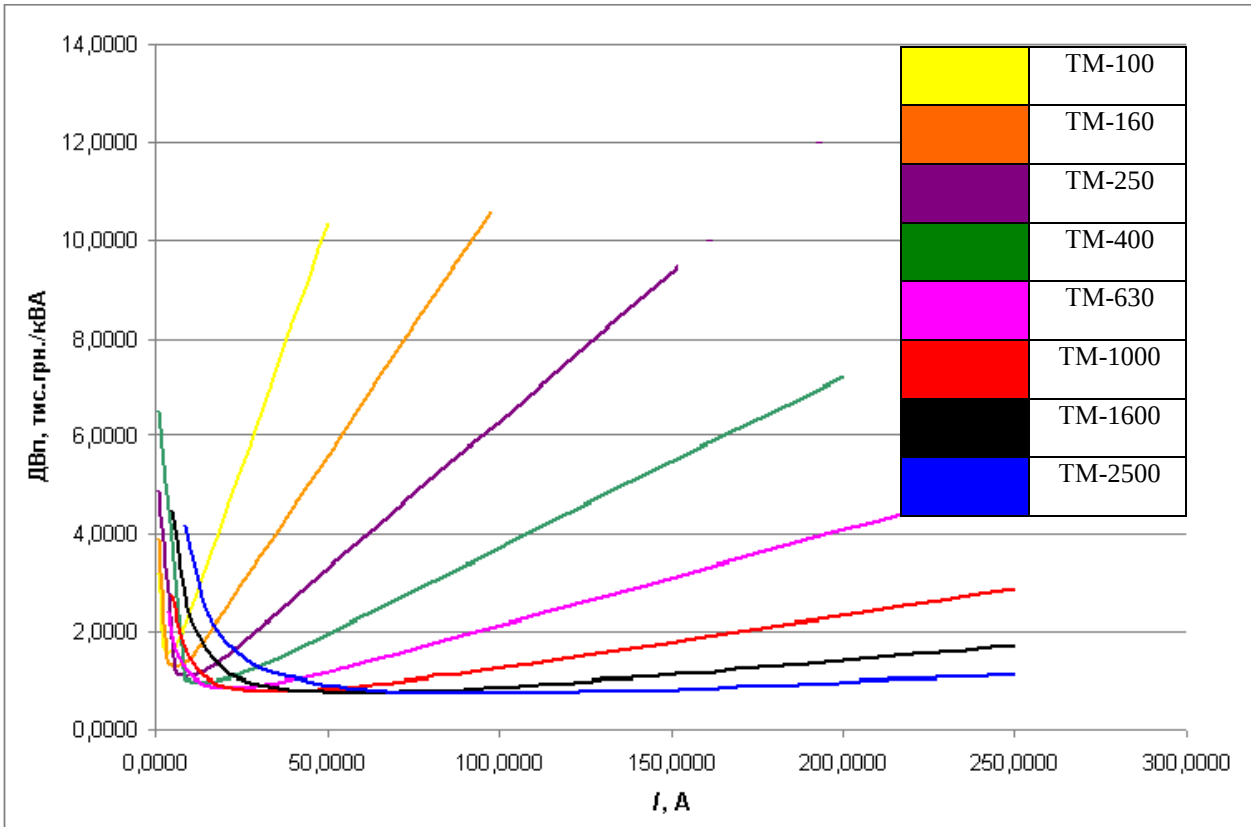

Рис. 1 Область інтегрування питомих дисконтованих витрат для трансформаторів ТМ 100 кВ·А–2500 кВ·А

3.4.3 Алгоритм та програмна реалізація

Алгоритм стохастичної мінімізації дисконтованих витрат методом ІМ наведено в [1]. Застосуємо його і для питомих дисконтованих витрат:

– Знаючи середнє значення сили струму $\overline{I}_i$ та коефіцієнта його варіації $v[I]$, методом Монте-Карло моделюємо n значень сили струму I_i, $i = 1...n$, розподіленого за нормальним законом.

– Для кожного j-го варіанта (j-ї номінальної потужності трансформатора), $j = 1…m$, розраховуємо значення питомих дисконтованих витрат $ДВ_{п.i.j}$ за виразом

$$ДВ_{п.i.j} = \frac{a_{п.j}}{|I_i|} + в_{п.j}|I_i| + c_{п.j}.$$

– За отриманими значеннями $ДВ_{п.i.j}, i = 1...n, j = 1...m$ будуємо функції розподілу для кожного з варіантів $f_j(ДВ_{п.i})$.

– Виконуємо r-реалізацій для певних середнього значення сили струму та його коефіцієнта варіації, щоб отримати вибірку значень витрат $ДВ_{п.k.i.j}$, де $k = 1...r$.

– Знаходимо таке j, для якого з m варіантів найчастіше з кількості r-реалізацій виконувалась умова

$$ДВ_{к.i.j} = \min_{k=1..r}(ДВ_{к.i.j})$$

Для цього задаємось випадковим числом $z = [0...1]$ і, застосовуючи значення функції розподілу кожного з варіантів $f_j(ДВ_i)$, отримуємо $ДВ_{п.к.i.j}$.

Порядок розрахунку економічних параметрів розподілу навантажувального струму наступний. Для кожного коефіцієнта варіації струму $v[I]$ як варіанти n_i розглядаємо середні значення струму $\overline{I}_i$ і розраховуємо імовірності p_i за виразом (16). Економічним буде те значення $\overline{I}_i$, за яким виконується умова (17). Аналогічно під час розрахунку зон рівноекономічних параметрів розподілу

навантажувального струму знаходимо значення $\overline{I}_i$, за яким умова (17) буде виконуватись для двох сусідніх номінальних потужностей трансформаторів.

В програмі для моделювання стандартних нормально розподілених випадкових величин застосовано перетворення Бокса-Мюллера. Цей метод є більш точним на відміну, наприклад, від методів, що ґрунтуються на центральній граничній теоремі.

Програма імітаційного моделювання, яка використовувалась в роботі, запрограмована мовою програмування C#.

За допомогою розробленої програми для трансформаторів ТМ знайдемо зони рівноекономічності (рис. 2) згідно з прорахованими коефіцієнтами $a_п$, $в_п$ в таблиці 4.

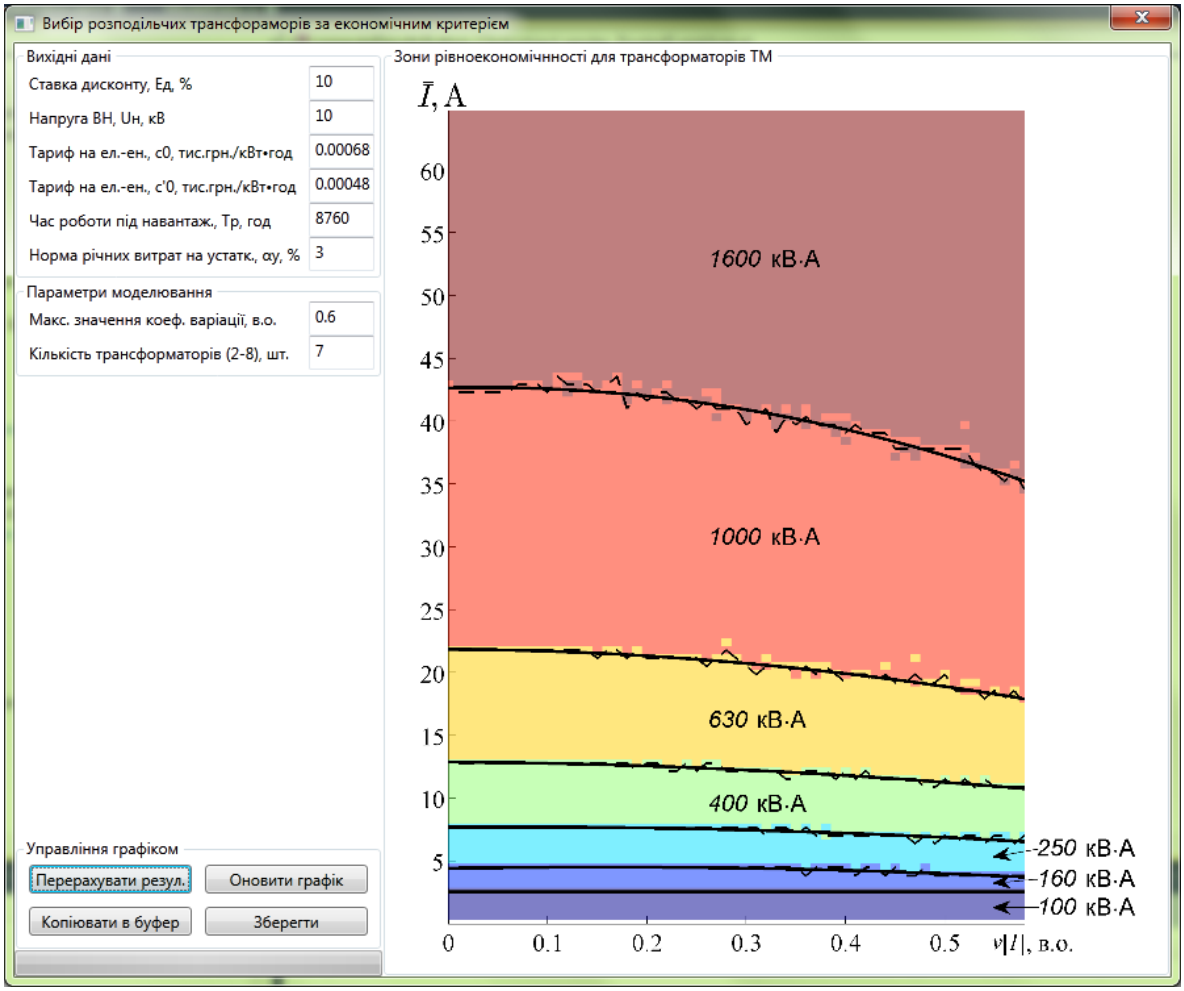

Рис. 2 Зони рівноекономічності для трансформаторів ТМ 100-1600 кВА, отримані за допомогою програми імітаційного моделювання

3.5 Оцінка чутливості моделі стохастичної мінімізації питомих дисконтованих витрат

Для порівняльного аналізу розглянемо як же зміняться криві та зони економічних параметрів розподілу навантажувального струму трансформатора при зміні норми дисконту, тарифу на електроенергію та капітальних вкладень. Всі розрахунки виконуються аналогічно за наведеними формулами, тому наводимо тільки кінцеві таблиці, що слугують вихідними даними для побудови таких зон.

3.5.1 Зміна норми дисконту

Таблиця 6 – Коефіцієнти $a_п$, $в_п$ при зміні норми дисконту

Тип трансформатора	$e_д$ **= 0,1**		$e_д$ **= 0,2**	
	$a_п$	$в_п$	$a_п$	$в_п$
ТМ-100/10	2,99322	0,20612	2,39454	0,10306
ТМ-160/10	3,76906	0,10831	2,98395	0,05415
ТМ-250/10	4,81566	0,06194	3,77946	0,03097
ТМ-400/10	6,50617	0,03597	5,01388	0,01798
ТМ-630/10	9,27156	0,02004	7,25739	0,01002
ТМ-1000/10	13,50804	0,01130	10,54688	0,00565
ТМ-1600/10	22,16343	0,00654	17,75297	0,00327

Таблиця 7 – Необхідні дані для побудови функції розподілу питомих дисконтованих витрат при зміні норми дисконту

№ з/п	Тип транформатора	$I_н$, А	$\bar{I}$, А	I_{min}, А	I_{max}, А	ДВ$_{п..max.1}$, тис.грн/кВ·А	ДВ$_{п.max.2}$, тис.грн/кВ·А	I_{min}, А
1	ТМ-100	5,7735	5,5514	2,2206	8,8823	1,3072	1,1850	4,8202
2	ТМ-160	9,2376	8,8823	3,5529	14,2117	1,0323	0,9796	7,4229
3	ТМ-250	14,4338	13,8786	5,5514	22,2058	0,8527	0,8579	11,0468
4	ТМ-400	23,0940	22,2058	8,8823	35,5292	0,7242	0,7801	16,6974
5	ТМ-630	36,3731	34,9741	13,9896	55,9586	0,6589	0,6903	26,9158
6	ТМ-1000	57,7350	55,5144	22,2058	88,8231	0,6004	0,6206	43,2050
7	ТМ-1600	92,3760	88,8231	35,5292	142,1170	0,6158	0,5896	73,6851

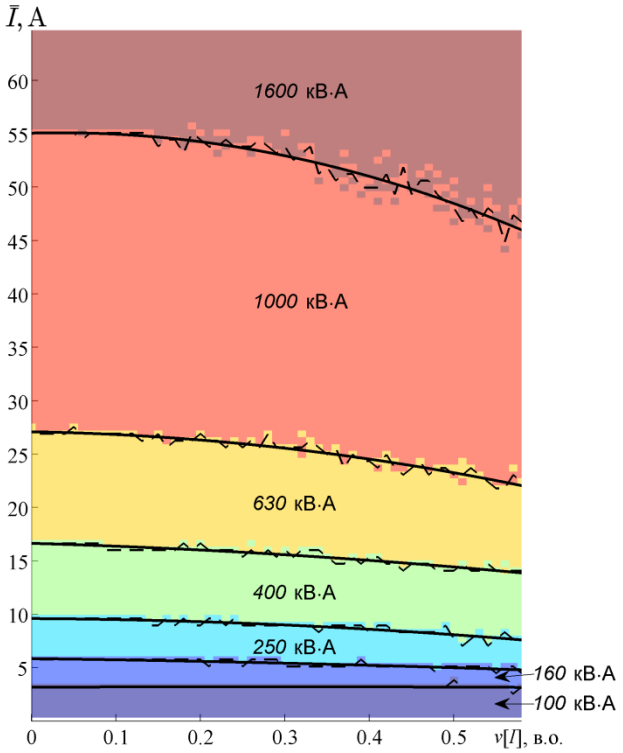

Рис. 3 Зони економічних інтервалів параметрів трансформаторів за збільшення норми дисконту

3.5.2 Зміна тарифу на електроенергію

Таблиця 8 – Коефіцієнти $a_п$, $в_п$ при зміні тарифу на електричну енергію

Тип трансформатора	c_0 = 0,0005678 тис.грн/кВт·год		c_0 = 0,0006896 тис.грн./кВт·год	
	$a_п$	$в_п$	$a_п$	$в_п$
ТМ-100/10	2,86170	0,16972	2,99322	0,20612
ТМ-160/10	3,59226	0,08918	3,76906	0,10831
ТМ-250/10	4,57849	0,05100	4,81566	0,06194
ТМ-400/10	6,14827	0,02961	6,50617	0,03597
ТМ-630/10	8,81879	0,01650	9,27156	0,02004
ТМ-1000/10	12,83966	0,00930	13,50804	0,01130
ТМ-1600/10	21,27945	0,00538	22,16343	0,00654

Таблиця 9 – Необхідні дані для побудови функції розподілу питомих дисконтованих витрат при зміні тарифу на електричну енергію

№ з/п	Тип транформатора	$I_н$, А	Iсер, А	I_{min}, А	I_{max}, А	$ДВ_{п.max.1}$, тис.грн/кВ·А	$ДВ_{п.max.2}$, тис.грн/кВ·А	I_{min}, А
1	ТМ-100	5,7735	5,5514	2,2206	8,8823	1,6656	1,8297	4,1063
2	ТМ-160	9,2376	8,8823	3,5529	14,2117	1,3279	1,5202	6,3467
3	ТМ-250	14,4338	13,8786	5,5514	22,2058	1,1079	1,3387	9,4748
4	ТМ-400	23,0940	22,2058	8,8823	35,5292	0,9552	1,2252	14,4087
5	ТМ-630	36,3731	34,9741	13,9896	55,9586	0,8612	1,0807	23,1211
6	ТМ-1000	57,7350	55,5144	22,2058	88,8231	0,7848	0,9710	37,1479
7	ТМ-1600	92,3760	88,8231	35,5292	142,1170	0,7902	0,9150	62,8652

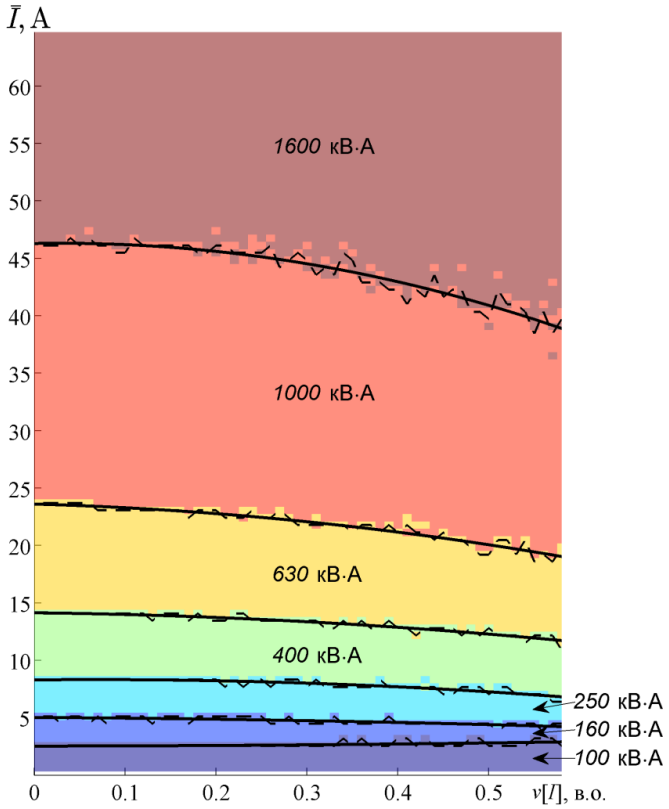

Рис. 4 Зони економічних інтервалів параметрів трансформаторів за збільшення тарифу на електроенергію

3.5.3 Зміна капітальних вкладень

Таблиця 10 – Коефіцієнти $a_п$, $в_п$ при зміні капітальних вкладень

Тип трансформатора	$К_1$, тис.грн./кВ·А		$К_2 = 2 \cdot К_1$, тис.грн./кВ·А	
	$a_п$	$в_п$	$a_п$	$в_п$
ТМ-100/10	2,99322	0,20612	4,48390	0,20612
ТМ-160/10	3,76906	0,10831	5,20521	0,10831
ТМ-250/10	4,81566	0,06194	6,30739	0,06194
ТМ-400/10	6,50617	0,03597	7,98308	0,03597
ТМ-630/10	9,27156	0,02004	10,72955	0,02004
ТМ-1000/10	13,50804	0,01130	14,97569	0,01130
ТМ-1600/10	22,16343	0,00654	23,64055	0,00654

Таблиця 11 – Необхідні дані для побудови функції розподілу питомих дисконтованих витрат при зміні капітальних вкладень

№ з/п	Тип транформатора	$I_н$, А	$\bar{I}$, А	I_{min}, А	I_{max}, А	$ДВ_{п..max.1}$, тис.грн/кВ·А	$ДВ_{п.max.2}$, тис.грн/кВ·А	I_{min}, А
1	ТМ-100	5,7735	5,5514	2,2206	8,8823	2,4770	2,3357	4,6641
2	ТМ-160	9,2376	8,8823	3,5529	14,2117	1,8499	1,9055	6,9324
3	ТМ-250	14,4338	13,8786	5,5514	22,2058	1,4800	1,6595	10,0910
4	ТМ-400	23,0940	22,2058	8,8823	35,5292	1,2182	1,5026	14,8982
5	ТМ-630	36,3731	34,9741	13,9896	55,9586	1,0472	1,3129	23,1416
6	ТМ-1000	57,7350	55,5144	22,2058	88,8231	0,9253	1,1723	36,4041
7	ТМ-1600	92,3760	88,8231	35,5292	142,1170	0,8977	1,0957	60,1254

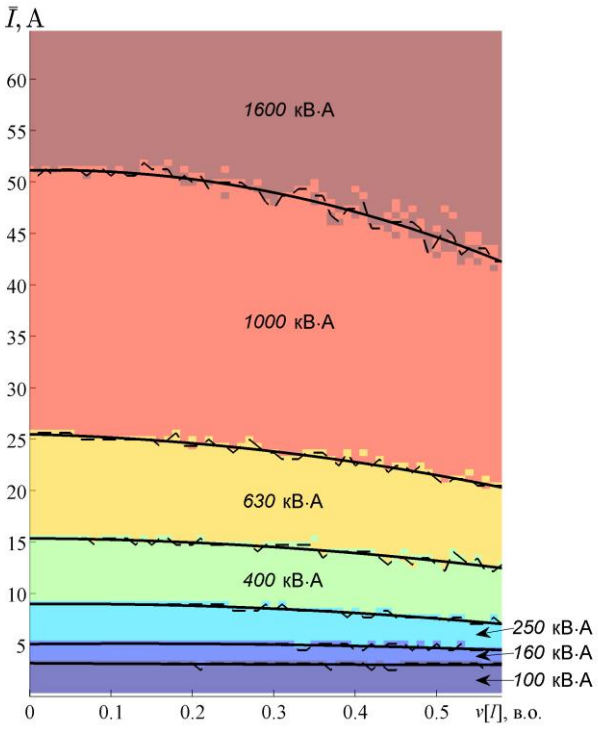

Рис. 5 Зони економічних інтервалів параметрів трансформаторів за збільшення капіталовкладень

Висновки

1. Для правильного вибору оптимального варіанту в ЕПС, що забезпечує економію енергоресурсів і матеріалів, необхідно в інженерній практиці використовувати більш коректну стохастичну модель за економічними критеріями, яка найбільш адекватно відображає реальний характер показників економічності.

2. Вибір елементів ЕПС пропонується здійснювати на основі стохастичної мінімізації питомих дисконтованих витрат за пропонованою методикою з застосуванням розробленої програми і підпрограм для ЕОМ в середовищі .Net Framework мовою C#, яка для зручності і простоти дозволяє отримати криві оптимальних за критерієм економічності параметрів розподілу електричних навантажень або зони економічних інтервалів цих параметрів.

Оцінка чутливості моделі стохастичної мінімізації питомих дисконтованих витрат, проведена з урахуванням зміни норми дисконту, тарифу на електроенергію та вартості капіталовкладень, показала, що у разі збільшення норми дисконту $(e_{\text{д}}=0{,}1 \rightarrow e_{\text{д}}=0{,}2)$, значення вартості тарифу на електроенергію ($c_0=0{,}10006896$ тис.грн./кВт·год $\rightarrow$ $c_0=0{,}0005678$ тис.грн./кВт·год) та збільшенні капіталовкладень збільшується значення середнього струму, за якого питомі дисконтовані витрати є мінімальними. Також в усіх цих випадках спостерігається розширення зон економічних інтервалів параметрів трансформаторів, тобто трансформатори певної номінальної потужності стає доцільно використовувати за більших середніх значень струму.

Література

1. **Денисенко Н. А.** Стохастическая модель выбора и оптимизации в системах электроснабжения по экономическим критериям / Н.А. Денисенко, И. Хоффманн // Изв. АН. Энергетика. – 1992. – № 5. – С. 87–94. − Библиогр. : с. 94.

2. **Денисенко М. А.** Спеціальні питання електропостачання [Текст] навч. посіб. / М.А. Денисенко. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – Ч. 1.: Вибір елементів електропостачальних систем на основі стохастичного моделювання процесів, що відбуваються в них. – 288 с. – Бібліогр.: с. 273–283.

3. **ГКД 340.000.002-97** «Методика определения экономической эффективности капитальных вложений в энергосистемы и электрические сети».

4. **Денисенко Н. А.** Применение вероятностных моделей в многокритериальной оптимизации параметров электроустановок / Н. А. Денисенко, И. Хоффманн, Е.Н. Иншеков – Тез. докл. Научно-техническая конференция «Повышение эффективности и качества электроснабжения», 19–21 мая 1990 г.: [тез. докл.]. – Мариуполь : Изд-во ММИ, 1990. – С. 42–45. − Библиогр. : с. 45.

УДК 536.248.2

А.И. СКИЦКО

ЧИСЛЕННОЕ *RNG*-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕМ КАНАЛЕ

O. SKITSKO

NUMERICAL *RNG* - SIMULATION PARAMETERS OF THE FLOW IN A VERTICAL STEAM-GENERATING CHANNEL

Аннотация. На основе модифицированной RNG k-ε модели проведено численное исследование двухфазного потока в вертикальном канале. Разработана многомерная математическая модель двухфазного потока, учитывающая эффекты фазового перехода. Проанализированы закономерности изменения теплогидравлических параметров потока в продольном и поперечном направлениях.

Ключевые слова: RNG – моделирование, двухфазный поток, теплообмен, гидродинамика, турбулентность.