

УДК 621.315 + 631.1

**Назарова Ольга Петрівна -**

*кандидат технічних наук, доцент кафедри «Вища математика і фізика»*

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

*orcid.org/0000-0003-0636-4748*

*e-mail: nazarova777o@gmail.com*

**Рожкова Олена Павлівна -**

*старший викладач кафедри «Вища математика і фізика»*

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

*orcid.org/0000-0003-2393-6090*

*e-mail: eleropa67@gmail.com*

## **ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

*Анотація.* В статті розроблено динамічне моделювання в пакеті MathCad, автоматизований розрахунок характеристик, номінальні струми та напруги первинної і вторинної обмоток силових трансформаторів 10/0,4 кВ. Розраховано залежність змінювання вторинної напруги трансформатора від характеру навантаження. Проведено розрахунки зовнішньої характеристики трансформатора при активно-індуктивному навантаженні і ємнісному навантаженні. Розраховані залежності ккд трансформатора від величини навантаження при різних значеннях  $\cos \varphi_2$ .

Визначено економічне навантаження при якому втрати потужності будуть мінімальними, повні втрати енергії за рік в період експлуатації двох силових трансформаторів, які встановлено на ТП 10/0,4 кВ. На базі результатів досліджень розроблена тестова розрахункова курсова робота для магістрантів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**Ключові слова:** трансформатор, паралельна робота, зовнішня характеристика, навантаження, напруга.

**Постановка проблеми.** Трансформатор є унікальним пристроєм, завдяки якому синусоїдальний струм зайняв чільне місце в електроенергетиці. Унікальність трансформатора полягає в тому, що трансформація напруги (струму) в ньому відбувається без участі будь-яких рухомих частин і з дуже високим коефіцієнтом корисної дії. До того ж трансформатори можуть бути виготовлені як для роботи у ланцюгах промислової частоти, так і для роботи на частотах значно вищих – до багатьох тисяч герц і практично для будь-яких величин напруги – від мілівольт (вимірювальні трансформатори) до сотень кіловольт для високовольтних ліній передач

Одним з головних завдань експлуатації трансформаторів є контроль режиму їх роботи. Цей контроль здійснюється шляхом перевірки навантаження трансформатора, напруги на обмотках, температури масла і інших параметрів. На підстанціях з постійним чергуванням персоналу контроль здійснюється з періодичністю 1...2 години з фіксацією параметрів режиму в добовій відомості. Експлуатацію силових трансформаторів здійснюють відповідно до чинних директивно-нормативними документами.

При паралельній роботі трансформаторів і змінному графіку їх сумарного навантаження можлива оптимізація кількості працюючих трансформаторів протягом доби. Критерій оптимальності - мінімум втрат активної потужності. Однак, обчислення всіх характеристик досить трудомісткий процес, також не завжди можливо наочно побудувати залежності. Тому моделювання процесів можливо розрахувати в пакеті MathCad, чому створені програмні блоки можна використовувати при написанні курсових і дипломних робіт для магістрантів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Номінальна потужність трансформатора визначається його допустимим нагріванням. Для кожного

трансформатора на основі заводських даних визначають максимально допустиму температуру верхніх шарів масла. Ця температура для трансформаторів без примусової циркуляції масла не повинна бути вище 35 С. Перевищення температури масла над температурою навколишнього повітря повинна бути не більше 60 С.

На підстанціях без постійного чергування персоналу контроль режиму трансформаторів здійснюється при кожному відвідуванні підстанції оперативним персоналом, але не рідше 1 разу на місяць.

Визначення номінальні параметрів трансформаторів розглядається в літературі [1, 10] для різних типів.

Силові трансформатори можуть працювати в різних режимах, які характеризуються навантаженням, напругою, умовами навколишнього середовища та іншими факторами. При навантаженні, що не перевищує номінальну, допускається тривала робота трансформатора при підвищенні напруги на будь-якому відгалуженні будь обмотки на 10% понад номінальної напруги даного відгалуження.

### **Мета статті.**

Розробка динамічного моделювання характеристик силових трансформаторів та розрахунок оптимальних режимів навантаження, побудова залежності характеристик.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Принцип дії трансформатора розглянемо на прикладі однофазного трансформатора з двома обмотками – первинною і вторинною, приведенного на рис.1.

На рисунку зображено замкнутий магнітопровід, на якому розташовані дві обмотки з числом витків  $w_1$  і  $w_2$ . До однієї з них (первинної) підводиться електрична енергія від джерела живлення, до іншої (вторинної) підключається приймач енергії.

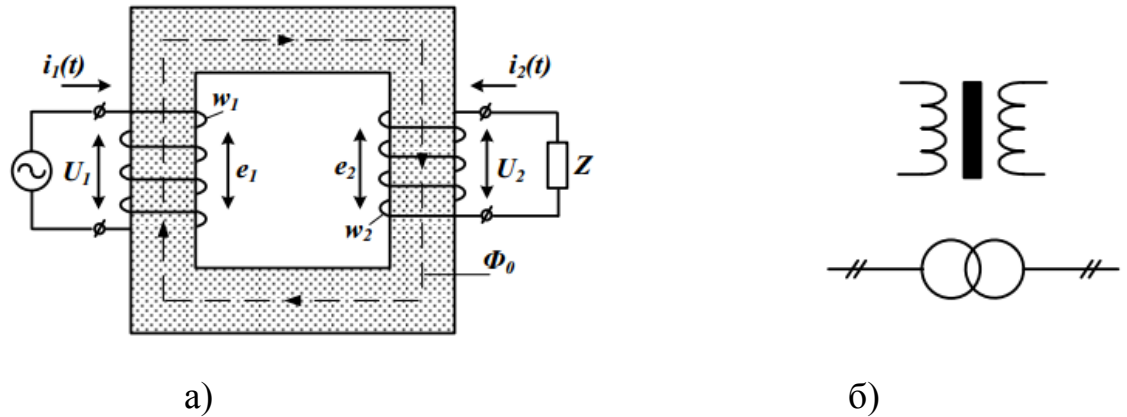


Рис.1. Електромагнітна схема і умовне графічне зображення однофазного трансформатора з двома обмотками – первинною (а) і вторинною (б).

Визначення параметрів залежності змінювання вторинної напруги трансформатора від характеру навантаження

$$\Delta U_2 \% = \beta \cdot \left( u_{ка} \% \cdot \cos \varphi_2 + u_{кр} \% \cdot \sin \varphi_2 \right), \quad (1)$$

де  $\Delta U_2 \%$  – змінювання вторинної напруги трансформатора, %;  $\beta$  – коефіцієнт навантаження трансформатора. Приймаємо  $\beta = 1$  за умовами завдання,  $u_{ка}$ ,  $u_{кр}$  – відповідно активна і реактивна складова напруги короткого замикання трансформатора, %:

$$\Delta u_{ка} \% = \frac{I_{ном1} \cdot R_K}{U_{\phi 1}} \cdot 100, \quad \Delta u_{кр} \% = \frac{I_{ном1} \cdot X_K}{U_{\phi 1}} \cdot 100, \quad (2)$$

Всі отримані дані підставляємо у формулу залежності  $\Delta U_2 \%$  (1) змінюючи кут  $\varphi_2$  в межах від  $+90^\circ$  до  $-90^\circ$  для номінального навантаження (рис.2.).

Таким чином при активному навантаженні  $\Delta U_2$  може змінюватись до 1,144%. При індуктивному навантаженні змінювання вторинної напруги змінюється в діапазоні від 1,144% до 5,38%; при ємнісному навантаженні

змінювання вторинної напруги змінюється в діапазоні від 1,144% до -5,38%.

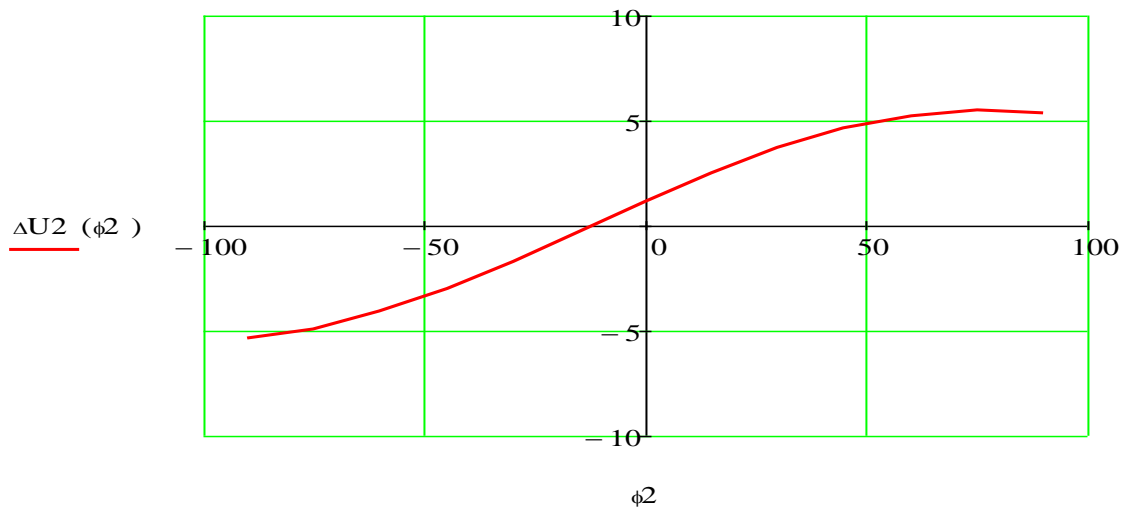


Рис. 2. Залежність зміни напруги від характеру навантаження

Зовнішня характеристика, є залежністю вторинної напруги від коефіцієнта навантаження при незмінних значеннях первинної напруги ( $U_1=U_1$ ,  $H=\text{const}$ ), частоти ( $f=\text{const}$ ) і незмінному характері навантаження ( $\cos \varphi_2=\text{const}$ ).  $U_2'=f(\beta)$ ;  $U=\text{const}$ ,  $\omega c=\text{const}$ ,  $\cos \varphi_2=1$ ;  $\cos \varphi_2=0,8$   $\varphi_2>0$ ;  $\cos \varphi_2=0,8$   $\varphi_2<0$ . Вторинна напруга знижується із збільшенням навантаження із-за збільшення активного і індуктивного падінь напруги у вторинній обмотці трансформатора. Значення характеристики вторинної напруги у відсотках при  $\cos \varphi_2=1$ ,  $\cos \varphi_2=0,8$  та при  $\varphi_2<0$ , тобто при активному, індуктивному і ємкісному навантаженні.

Приймаємо змінювання навантаження трансформатора від  $0,075I_H \leq \beta \leq 1,5I_H$ , а вторинну напругу у відносних одиницях, яка дорівнює номінальній напрузі і отримуємо  $U_2H=1$ , так як  $U_2/UH$ .

$$\Delta U_2' = 1 \cdot \left( 1 - \frac{\beta \cdot (U_{ka} \cdot \cos \varphi_2 + U_{kp} \cdot \sin \varphi)}{100} \right) \quad (3)$$

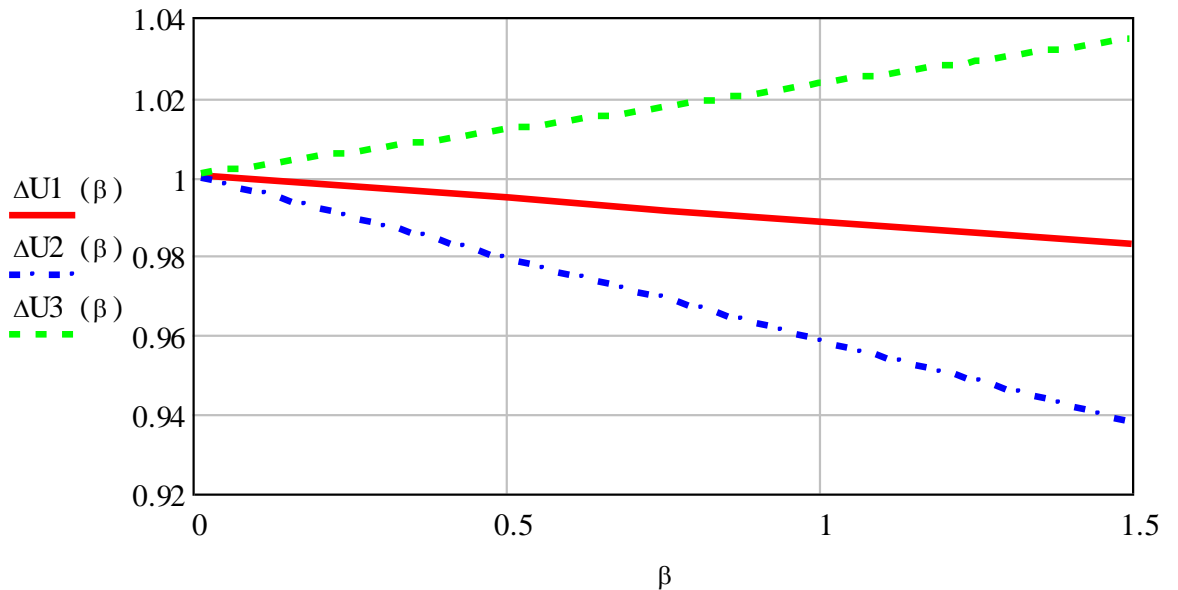


Рис. 3. Графічні залежності зовнішніх характеристик трансформатора:

$\Delta U1 (\beta)$  - Зовнішня характеристика трансформатора при  $\cos \phi_2 = 1$ ,

$\Delta U2 (\beta)$  - Зовнішня характеристика трансформатора при  $\cos \phi_2 = 0,8$ ,  $\phi_2 > 0$ ,

$\Delta U3 (\beta)$  - Зовнішня характеристика трансформатора при  $\cos \phi_2 = 0,8$ ,  $\phi_2 < 0$

Таким чином, при  $\cos \phi_2 = 1$ , тобто при активному навантаженні вторинна напруга змінюється від 1 до 0,983 і складає 1,715%; при  $\cos \phi_2 = 0,8$ ,  $\phi_2 > 0$ , тобто при індуктивному навантаженні вторинна напруга змінюється від 1 до 0,938 і складає 6,213%; при  $\cos \phi_2 = 0,8$ ,  $\phi_2 < 0$ , тобто при ємнісному навантаженні вторинна напруга змінюється від 1 до 1,035 і складає (-3,469%).

У більшості трансформаторів величина втрат холостого ходу складає менш ніж 1% від номінальної потужності трансформатора. Утрати на резистивному опорі обмоток при номінальній величині струмів у них з достатньою мірою точності визначаються у досліді короткого замикання.

Взагалі при розрахунку трансформаторів орієнтуються на їхню середню завантаженість, яка відповідає величинам 0,5...0,7.

К.к.д. трансформатора, як і електричної машини, із збільшенням відносного навантаження  $\beta$  спочатку зростає, досягаючи при певнім значенні  $\beta$  максимуму, а потім зменшується при подальшому збільшенні навантаження.

ККД трансформаторів залежить від величини навантаження  $\beta$  і від її характеру  $\cos(\varphi_2)$ . Максимальне значення ККД  $\beta_{\max}$  відповідає навантаженню  $\beta$ , при якому електричні втрати дорівнюють магнітним.

Залежність ккд трансформатора від коефіцієнта навантаження визначається за виразом:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_{\text{к.ном}}}{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{\text{к.ном}}}, \quad (4)$$

де  $P_0$ ,  $P_{\text{кн}}$  – втрати холостого ходу і короткого замикання трансформатора, Вт.

Коефіцієнт навантаження, коли ккд буде максимальним, це значення у точці перегибу, коли втрати холостого ходу і втрати короткого замикання, тобто зміні втрати дорівнюють постійним.

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{к.ном}}}}, \quad (5)$$

Таким чином трансформатор буде працювати з максимальним ККД при коефіцієнті навантаження  $\beta_{\max} = 0,429$ . Значення ККД буде найбільшим при активному навантаженні  $\cos \phi_2 = 1$

При  $\cos \phi_2 = 1$  ккд змінюється на 0,8% при зміні  $\beta$  від 0 до 1.5; к.к.д. трансформатора виходить найбільшим за умови, коли змінні втрати в обмотках дорівнюють постійним втратам холостого ходу.

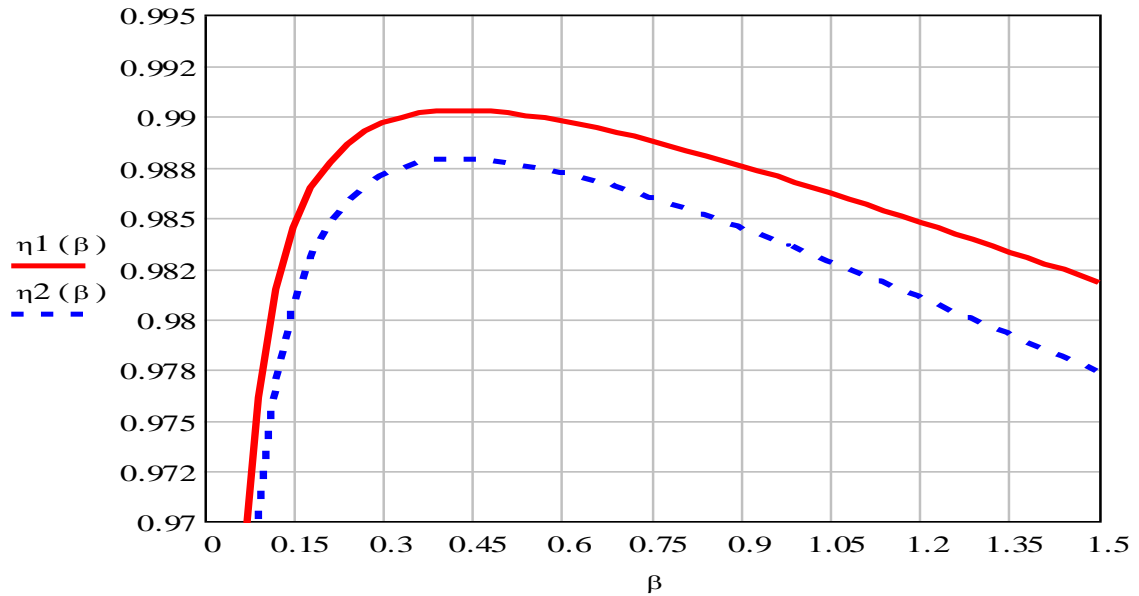


Рис. 4. Крива залежності ККД трансформатора від величин навантаження ( $\eta_1(\beta)$ - де  $\cos \phi_2 = 1$ ,  $\eta_2(\beta)$  - де  $\cos \phi_2 = 0,8$ )

Наявність надлишкових трансформаторних потужностей висуває завдання раціонального їх використання. В запропоновано кількісні оцінки навантажень силових трансформаторів підстанцій, при яких перехід на паралельну роботу створює позитивний ефект.

При роздільній роботі трансформаторів при максимальному навантаженні загальні активні втрати будуть складати:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{T1 \max} + \Delta P_{T2 \max}; \quad \Delta P_{\Sigma \%} = \frac{\Sigma \Delta P - \Delta P_{\Sigma}}{\Sigma \Delta P} \cdot 100\%. \quad (10)$$

При роздільній роботі трансформаторів при максимальному навантаженні загальні реактивні втрати будуть складати:

$$\Sigma \Delta Q = \Delta Q_{T1 \max} + \Delta Q_{T2 \max}; \quad \Delta Q_{\Sigma \%} = \frac{\Sigma \Delta Q - \Delta Q_{\Sigma}}{\Sigma \Delta Q} \cdot 100\%. \quad (11)$$

При роздільній роботі трансформаторів при максимальному навантаженні загальні втрати електроенергії будуть складати:

$$\Sigma \Delta W = \Delta W_{T1 \max} + \Delta W_{T2 \max}; \quad \Delta W_{\Sigma \%} = \frac{\Sigma \Delta W - \Delta W_{\Sigma}}{\Sigma \Delta W} \cdot 100\%. \quad (13)$$



## Результати розрахунків кривих наведених витрат (рис.5)

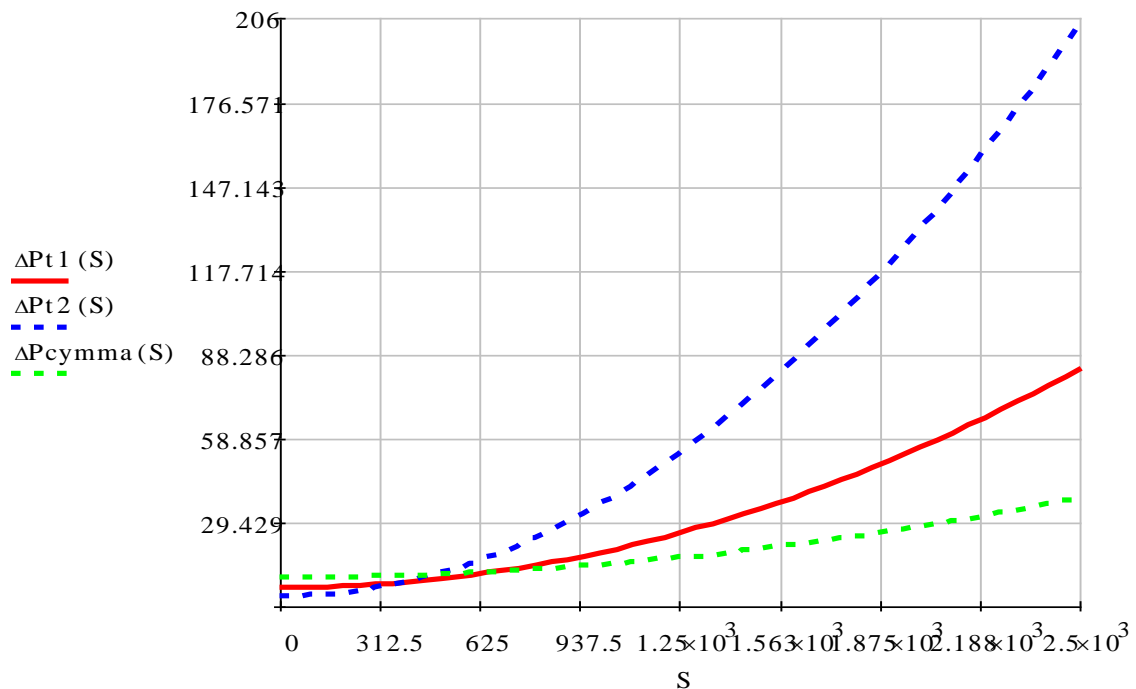


Рис.5. Графічні залежності приведених активних витрат трансформаторів, де

$\Delta P_{t1}$  (С) - наведені активні втрати TV1;

$\Delta P_{t2}$  (С) - наведені активні втрати TV2;

$\Delta P_{\text{сумма}}$  (С) - наведені активні втрати TV1 і TV2.

Значення навантажень при яких втрати потужності будуть рівні для 1-го та 2-го трансформаторів, а також втрати 2-го і сумарним втратам при паралельній роботі трансформатора. Ці значення відповідно рівні.

Найменші втрати першого трансформатора на першому етапі навантаження від холостого ходу, до 379,185 кВА, робота другого трансформатора найкраща від 379,185 кВА до 679,958 кВА;

Найкращій режим на останньому етапі, коли працюють обидва трансформатори паралельно від 679,958 кВА.

Статистика свідчить, що загальний максимум складає 92% від загального навантаження. а між трансформаторами це навантаження розкладається як 88% для першого і 95% для другого.

Таким чином, при забезпеченні максимального навантаження найменші втрати активної і реактивної потужності будуть при паралельній

роботі; під час роздільної роботи трансформаторів на те ж навантаження втрати активної і реактивної потужності будуть більші, відповідно, на 37,33% і 0,068%.

**Висновки з дослідження і перспективи подальших розробок.** В пакеті MathCad автоматизовано розрахунок характеристик, визначено номінальні струми та напруги первинної і вторинної обмоток силових трансформаторів 10/0,4 кВ, встановлено, що характеристика представляє собою лінійну залежність, яка при активно-індуктивному навантаженні має слабо падаючий характер, а при ємнісному навантаженні збільшується: трансформатор досягає найбільшого ККД у роботі при навантаженні рівному  $\beta_{\max} = 0,429$ , визначено повні втрати енергії за рік в період експлуатації двох силових трансформаторів, які встановлено на ТП 10/0,4 кВ; при забезпеченні максимального навантаження найменші втрати активної і реактивної потужності будуть при паралельній роботі; під час роздільної роботи трансформаторів на те ж навантаження втрати активної і реактивної потужності будуть більші, відповідно, на 37,33% і 0,068%.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

- 1) Блок В. М. Электрические сети и системы [Текст] / В. М. Блок. – М.: Высшая школа, 1986. – 432 с.
- 2) Быстрицкий Г. Ф. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: учеб. пособие для вузов [Текст] / Г. Ф. Быстрицкий, Б. И. Кудрин. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 176 с.
- 3) Єрмолаєв С. О. Експлоатація енергообладнання та залежного автоматизації в системі АПК: підручник / С. О. Єрмолаєв, В. О. Мунтян, В. Ф. Яковлев. // За червоний. С. О. Єрмолаєва. - К.: Мета, 2003. - 543 с
- 4) Рудницький В. Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування: навчальний посібник [Текст] / В. Г. Рудницький. - Суми: ВТД «Університетська кня», 2006. - 153 с.
- 5) Романюк Ю.Ю. Ф. Електричні системи та мережі: навч. посібник [Текст] / Ю.Ю. Ф. Романюк. - К.: Знання, 2007. - 292 с.

- 6) Справочник по дослідженню електрообладнання [Текст] / Ю.Ю. Г. Барибин, Л. Є. Федоров, М. Г. Зименков і др.]; pod obsch. червоний. YU. Г. Барибина, Л. Є. Федорова, М. Г. Зименкова, А. Г. Смирнова. - М.: Енергоатоміздат, 1990. - 576 с. Рудницький В. Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування: навчальний посібник [Текст] / В. Г. Рудницький. - Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. - 153 с.
- 7) Технічна експлуатація електричних станцій і мереж [Текст] / Міністерство палива та енергетики України. - К.: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2003. - 598 с.

#### СПИСОК ДЖЕРЕЛ

- 1) Blok V. M. Elektricheskiye seti i sistemy [Tekst] / V. M. Blok. - M.: Vysshaya shkola, 1986. - 432 s.
- 2) Bystritskiy G. F. Vybory i ekspluatatsiya silovykh transformatorov: ucheb. posobiye dlya vuzov [Tekst] / G. F. Bystritskiy, B. I. Kudrin. - M.: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2003. - 176 s.
- 4) Yermolayev S. O. Ekspluatatsiya enerhoobladnannya ta zasobiv avtomatyzatsiyi v systemi APK: pidruchnyk / S. O. Yermolayev, V. O. Muntyan, V. F. Yakovlyev. // Za red. S. O. Yermolayeva. - K.: Meta, 2003. - 543 s.
- 4) Rudnytskyy V. H. Vnutrishnozavodske elektropostachannya. Kursove proektuvannya: navchalnyy posibnyk [Tekst] / V. H. Rudnyts'kiy. - Sumy: VTD «Universytet-ska knyha», 2006. - 153 s.
- 5) Romanyuk YU. F. Elektrychni systemy ta merezhi: navch. posibnyk [Tekst] / YU. F. Romanyuk. - K.: Znannya, 2007. - 292 s.
- 6) Spravochnyk po proektyrovannyu élektrosnabzheniya [Tekst] / YU. H. Barybyn, L. E. Fedorov, M. H. Zymentkov y dr.] ; pod obsch. red. YU. H. Barybyna, L. E. Fedorova, M. H. Zymentkova, A. H. Smyrnova. - M.: Énerhoatomyzdat, 1990. - 576 s.
- 7) Tekhnichna ekspluatatsiya elektrychnykh stantsiy i merezh [Tekst] / Ministerstvo palyva ta enerhetyky Ukrayiny. - K.: Obyednannya enerhetychnykh pidpryyemstv «Haluzevyy rezervno-investytsiyyny fond rozvytku enerhetyky», 2003. - 598 s.

#### REFERENCES

**Назарова Ольга Петровна**<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика и физика», Таврический государственный агротехнологический университет.

*Наукові інтереси* Моделирование процессов и систем

**Рожкова Елена Павлівна**<sup>2</sup> - старший преподаватель кафедры «Высшая математика и физика», Таврический государственный агротехнологический университет.

*Наукові інтереси* теория та методика обучения (физика та технологи)

**NAZAROVA Olga Petrovna**<sup>1</sup> - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Higher Mathematics and Physics", Tavrichesky State Agrotechnological University.

*Circle of research interests: Modeling of processes and systems*

**ROZHKOVA Elena Pavlovna**<sup>2</sup> - Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics and Physics, Tavrichesky State Agrotechnological University.

*Circle of research interests: theory and teaching methods (physics and technology)*

*Назарова Ольга Петровна, Рожкова Елена Павловна*

## **ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

*Аннотация.* В статье рассмотрено динамическое моделирование расчета характеристик в пакете MathCad, автоматизированный расчет представлен для проверки задания студента при расчете курсовой работы в учебном процессе. Приведены алгоритмы и программные блоки расчетов номинальных токов и напряжения первичной и вторичной обмоток силовых трансформаторов 10/0,4 кВ. Представлена динамическая зависимость изменения вторичного напряжения трансформатора от характера нагрузки. Представлены программные блоки расчетов внешней характеристики трансформатора при активно-индуктивной нагрузке и емкостной нагрузке. Приведены графики зависимостей КПД трансформатора величины нагрузки при различных значениях  $\cos \varphi_2$ .

Определены нагрузка при которой потеря мощности будет минимальной, полные потери электроэнергии в период эксплуатации двух силовых трансформаторов, установленных на ТП 10/0,4 кВ, экономически обоснованы результаты.

На базе результатов исследований разработана тестовая расчетная курсовая работа для магистрантов специальности «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика»

**Ключевые слова:** трансформатор, параллельная работа, внешняя характеристика, нагрузка, напряжение.

*NAZAROVA Olga Petrovna, ROZHKOVA Elena Pavlovna*

## **DYNAMIC SIMULATION OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF POWER TRANSFORMERS**

*Summary.* The main task of operation of transformers is to monitor their mode operation, by checking the load of the transformer, the voltage on the windings, the temperature of the oil and other parameters. The nominal power of the transformer is determined by its permissible heating. For each transformer, the maximum allowable temperature of the upper layers of oil (not to be higher than 35 ° C) is determined on the basis of the factory data.

Power transformers can operate in different modes, characterized by load, voltage, environmental conditions and other factors.

With the parallel operation of the transformers and the sliding plot of their total load, optimization of the number of working transformers within a day is possible. The criterion of optimality is the minimum of loss of active power. The article discusses the dynamic modeling of the calculation of characteristics in the MathCad package, the automated calculation is presented to verify the student's tasks when calculating the course work in the educational process. Algorithms and software blocks for calculating the rated currents and voltages of the primary and secondary windings of 10/0.4 kV power transformers are presented. The dynamic dependence of the transformer secondary voltage change on the nature of the load is presented. Program blocks for calculating the external characteristics of a transformer with active-inductive load and capacitive load are presented. The graphs of dependencies of the transformer efficiency of the load value are given for different values of  $\cos \varphi_2$ . Calculates load at which the power loss will be minimal, the total loss of electricity during the operation of two power transformers installed on the 10 / 0.4 kV TP, the results are economically justified.

On the basis of the research results, a test calculation course work has been developed for undergraduates of the specialty "Electric power engineering, electrical engineering and electrical engineering"

**Keywords:** transformer, parallel work, external characteristic, load, voltage.