УДК 621.314.22 DOI 10.31548/energiya2019.06.075

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВОЛЬТОДОДАВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В СТАТИЧНИХ РЕЖИМАХ

П. П. Говоров, доктор технічних наук, професор

В. П. Говоров, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

А. К. Кіндінова, магістр

Харківський Національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова

E- mail: philip.govorov@gmail.com

Анотація. *Наведено розрахунково-експериментальні дослідження роботи вольтододавальних трансформаторів з тиристорним керуванням у різних режимах. Встановлено характер зміни модуля, фази і гармонійних складових ЕРС і струмів в обмотках трансформатора, дана їх кількісна оцінка та рекомендації з керування його режимами роботи.*

Для кількісної оцінки процесів в ВДТ проведені розрахункові дослідження з використанням програми Scilab.

З метою спрощення розрахунку і підвищення стійкості рішення задачі на структурній математичній моделі в подальшому враховано ЕРС розсіювання як ЕРС однієї з обмоток трансформатора. Таке спрощення практично не позначиться на точності розрахунків, оскільки в реальних умовах її величина незначна порівняно з номінальною напругою навантаження.

Для відтворення залежності $i_0 = f(\Psi)$ *застосований функціональний перетворювач з методичної похибкою (кусочно-лінійна апроксимація). Крива* $i_0 = f(\Psi)$ *відповідає кривій намагнічування, знятої за миттєвим значенням з боку послідовної обмотки. Характеристики вентилів прийняті ідеальними. У закритому стані характеристики керованих вентилів моделюються за запропонованим схемним принципом, шляхом введення на вхід структурної ланки другого рівняння системи (2) напруги –* $U_b(i)$*, відповідно напрузі на керованих вентилях.*

Для оцінки ступеня несинусоидальности проведено аналіз гармонійного складу параметрів режиму схеми.

Для ефективного регулювання у всьому діапазоні слід застосовувати схеми, в яких виключається можливість тривалої роботи трансформатора без розмагнічуючого контуру. Це, наприклад, схеми з індуктивними ключами або з триобмотковими ВДТ.

Ключові слова: ***вольтододавальний трансформатор, тиристорне керування, магнітна система***

Актуальність. Як відомо [1], найважливішими елементами інтелектуальних енергетичних систем (ESS), що визначають можливість і умови ефективного функціонування ESS, є силові активні елементи (АЕ). Ступінь їх досконалості в значній мірі визначає ефективність функціонування ESS в цілому. Тому забезпечення умов надійної та економічної роботи активних елементів, є важливим завданням підвищення ефективності роботи ESS.

Важливе місце серед АЕ займають пристрої силової електроніки, виконані на базі вольтододавальних трансформаторів (ВДТ) з електронним керуванням. Їх застосування в електричних мережах середньої та низької напруги в поєднанні із застосуванням плавного або плавно-ступеневого способу керування взмозі значно розширити функціональні можливості ESS, ефективність і якість роботи електричних мереж і підключених до них споживачів. Однак, в силу особливостей схеми приєднання ВДТ до мережі має місце ряд особливостей його роботи спільно з електронними керуючими елементами. Це відноситься до характеру зміни ЕРС і струмів в його обмотках. Їх наявність обумовлює зниження надійності і економічності роботи ВДТ і підключених до них споживачів. Викладене робить необхідним дослідження особливостей роботи ВДТ з електронними керуючими елементами і визначення умов їх надійної та економічної роботи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженням роботи ВДТ у тій чи іншій постановці завдання в різні роки займалися Шидловський А. К., Кузнецов В. Г., Липківський К. А., Новскій В. А. та ін. [2-4]. У цілому, зазначені дослідження присвячені в більшості своїй дослідженням статичних режимів ВДТ. У цей же час наявність особливостей квазістатичних режимів ВДТ і їх істотний вплив на надійність і якість роботи ESS вимагають проведення додаткових досліджень.

Мета дослідження – встановлення особливостей роботи ВДТ з електронними керуючими елементами, визначення умов їх надійної та економічної співпраці та підвищення ефективності роботи ESS.

Матеріали і методи дослідження. При створенні пристроїв на основі ВДТ необхідно враховувати деякі особливості роботи трансформаторів при різних

режимах комутації. Зокрема, характер зміни ЕРС на затискачах обмоток ВДТ в таких режимах:

1) холостого ходу, при глибокому насиченні магнітної системи ВДТ, викликаному магніторушійної силою струму навантаження;

2) у робочому режимі, при зустрічному або узгодженому включенні первинних обмоток ВДТ;

3) при перехідних процесах, викликаних комутаціями в колах первинних обмоток.

Для дослідження процесів в ВДТ були проведені експериментальні дослідження на натурному зразку ВДТ. Значення параметрів режиму і характеру їх зміни записувалися за допомогою осцилографу.

Принципова схема установки для дослідження роботи ВДТ у перерахованих режимах наведена на рис. 1. На рис. 2 зображена крива намагнічування магнітопровода ВДТ, а також миттєве значення магніторушійної сили $i_2\omega_2$, створюваної струмом навантаження, що протікає по вторинній обмотці ВДТ.

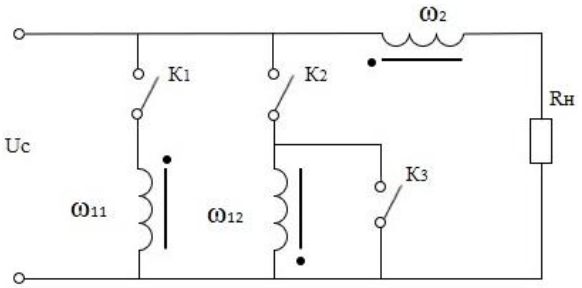


Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження режимів ВДТ

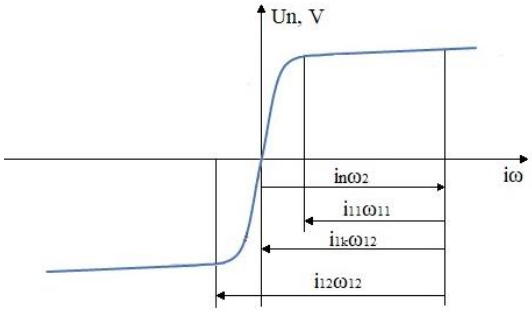
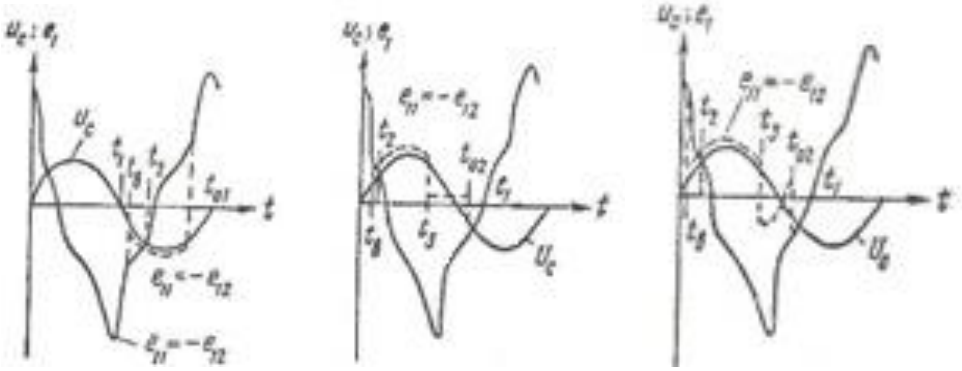


Рис. 2. Крива намагнічування магнітопровода ВДТ

У режимі холостого ходу обидві первинні обмотки відключені від мережі і муздрамтеатр глибоко насичений.

ЕРС E_{11} і E_{12} на затискачах первинних обмоток несинусоїдальний і їх амплітуда, як видно з кривих рис. 3, в 3-4 рази перевищує амплітуду напруги мережі.



а) б) в)

Рис. 3. Зміна ЕРС обмоток ВДТ у режимі холостого ходу і в режимах:

а - зустрічного включення; *б* – з устрічного включення і короткого замикання;

в - зустрічного і узгодженого включення

При активному навантаженні ЕРС E_{11} і E_{12} зсунуті в різні боки по відношенню до напруги мережі на кут, дещо відмінний від величини $\pi/2$, у зв'язку з тим, що трансформатор працює як дросель, вносячи індуктивність в коло навантаження. Миттєве значення напруги на комутуючих ключах K_1 і K_2, яке визначається, відповідно, як сума напруг мережі U_C і ЕРС E_{11} і E_{12}, у цьому режимі може перевищити 1000 В. Таким чином, режим холостого ходу ВДТ небажаний і з роботи регулятора повинен бути виключений.

У режимі зустрічного включення ЕРС обмотки ω_2, спрямована назустріч uc, зменшуючи напругу на виході регулятора. Режим може бути здійснений, якщо обмотку $\omega_{1г}$ (рис. 1) підключити до мережі, замкнувши ключ K_1. Таке включення в разі застосування тиристорних ключів повинно бути вироблено в момент часу $t_в$ при $t_1 < t_в < t_2$ (рис. 3, *а*), коли ЕРС зустрічної обмотки E_{11} більше напруги мережі U_C і спрямована йому назустріч.

Струм i_{11} піде назустріч напрузі U_C, створюючи магніторушійну силу $i_{11}\omega_{11}$. Під дією результуючої МРС $i_2\omega_2$ і $i_{11}\omega_{11}$ (рис. 2) ЕРС первинної обмотки зменшується, залишаючись дещо більше U_C. Форма ЕРС під впливом нелінійної індуктивності обмоток трансформатора незначно відхиляється від синусоїдальної. Напруга на ключі $К_1$, яка в цьому режимі визначається як різниця напруг E_{11} і U_C, в момент часу $t_{0г}$ стає рівним нулю. Тиристорний ключ відключається. Це відбувається раніше, ніж напруга стане рівною нулю. ВДТ переходить у режим холостого ходу.

У цьому випадку, як показують результати експерименту, час $t_{0г}$ залежить від моменту включення зустрічної обмотки $t_в$. Це необхідно враховувати при розробці схеми керування тиристорними ключами.

Якщо в момент часу $t_{0г}$ при включеному ключі $К_1$ ($t_в < t_{0г} < t_{01}$) закоротити обмотку ω_2 ключем $К_3$ (рис. 3, б), ВДТ перейде в режим короткого замикання. Струм $i_{1гл}$ в обмотці ω_{12} створить МРС $i_{1кз}\omega_{12}$, сумарна МРС зменшується до нуля і ЕРС E_1 та E_2 також зменшуються до нуля. Тиристорний ключ $К_1$ відключиться. Напруга на виході регулятора стане рівною U_C.

Якщо ж при включеному ключі $К_1$ замкнути $К_2$, в колі обмотки ω_{12} під впливом згідно спрямованих напруг E_{12} і U_C піде струм i_{12}, створюючи МРС $i_{12}\omega_{12}$, при цьому ЕРС E_1 і E_2 змінюють фазу на кут $\pi/2$ (рис. 3, в). Напруга на виході регулятора збільшується.

Включення ключа $К_3$ або $К_2$ при замкнутому $К_1$ призводить до різкого зменшення ЕРС E_2, у результаті чого напруга на ключі $К_1$ зменшується до нуля, змінює полярність і швидко наростає в першому випадку до величини U_C, у другому - приймає значення $2U_C$. При використанні симісторних або зустрічно-паралельно включених тиристорів вентиль, що працює, відключається, а зустрічний може включитися під впливом наростаючої напруги, оскільки швидкість наростання напруги dUr/dt у цих режимах досягає значних величин. Включення ключа $К_1$ при відкритому ключі $К_2$ або $К_3$ призводить до аварійного короткого замикання в колі первинних обмоток ВДТ. Під впливом індуктивності обмоток ВДТ струм через ключ $К_3$ в режимі короткого замикання або $К_2$ в режимі узгодженого включення досягає нульового значення з деяким запізненням після проходження напруги

мережі через нуль (точка t_{02} на рис. 3, б і 3, в). Це призводить до запізнювання відключення ключів $К_2$ або $К_3$. Час запізнювання, як видно з результатів експериментів, залежить від моменту включення ключів $К_3$ або $К_2$ (точка t_3 на рис. 3, б і 3, в). Це явище має бути враховано при розробці схеми керування тиристорн ключами, зокрема, вузла включення ключа $К_1$ і вибору моменту часу $t_в$.

Для кількісної оцінки процесів в ВДТ проведені розрахункові дослідження з використанням програми Scilab.

Диференціальні рівняння, що описують електромагнітний процес ВДТ при звичайних припущеннях, можна записати у вигляді

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{d\Psi}{dt} + u_{п1(i)}; \\ -u_2 &= r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + k\frac{d\Psi}{dt} + u_{b(i)}; \\ i_c &= i_1 + i_2 k \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

де r_1, r_2 - активні опори послідовної і збуджуючої обмоток трансформатора; L_1, L_2 - індуктивності розсіювання цих же обмоток; k - коефіцієнт трансформації трансформатора.

З метою спрощення розрахунку і підвищення стійкості рішення задачі на структурній математичній моделі в подальшому враховано ЕРС розсіювання як ЕРС однієї з обмоток трансформатора. Таке спрощення практично не позначиться на точності розрахунків, оскільки в реальних умовах її величина незначна порівняно з номінальною напругою навантаження.

Зведені до вигляду, зручного для математичного моделювання, рівняння мають вигляд

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\Psi}{dt} &= u_1 - r_1 i_1 - u_{n1(i)}; \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{1}{L_2}\left[-u_2 - r_2 i_2 - k\frac{d\Psi}{dt} - u_{b(i)}\right]; \\ u_{b(i)} &= -u_2 - k\frac{d\Psi}{dt}; \\ i_1 &= i_0 - i_2 k \end{aligned}\right\}, \qquad (2)$$

Третє рівняння системи (2) являє собою напругу на вентилях при струмі i_2=0. Воно отримано з рівняння рівноваги напруг у контурі збуджуючої обмотки.

Схемна модель ВДТ наведена на рис. 4. Для відтворення залежності i_0=f (Ψ) застосований функціональний перетворювач з методичної похибкою (кусочно-лінійна апроксимація). Крива i_0=f(Ψ) відповідає кривій намагнічування, знятої за миттєвим значенням з боку послідовної обмотки. Характеристики вентилів прийняті ідеальними. У закритому стані характеристики керованих вентилів моделюються за запропонованим схемним принципом шляхом введення на вхід структурної ланки другого рівняння системи (2) напруги – U_b (i), відповідно напрузі на керованих вентилях. На виході третьої ланки структурної моделі для моделювання характеристик вентилів у провідному стані підключено реле РП, контактами якого знімається напруга - U_b (i), що надходила раніше на вхід другої структурної ланки. Таким чином, замкнуті контакти реле РП відповідають закритим вентилям, розімкнуті - відкритим. Момент замикання вентилів, а тим самим момент замикання контактів реле, повинен строго відповідати моменту; при якому струм i_2 досягає нульового значення. Зміна тривалості работі вентилів здійснюється контактами реле РП.

Вольтамперная характеристика навантаження відтворюється за допомогою функціонального перетворювача.

Результати досліджень та їх обговорення. Параметри режиму схеми, що збуджується, в загальному випадку є несинусоїдальними функціями часу, що обумовлює в першу чергу несинусоїдальний впливає на збуджуючу обмотку трансформатора, а також нелінійністю параметрів трансформатора і навантаження.

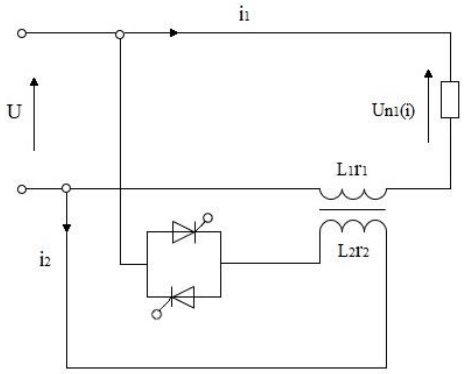


Рис. 4. Схемна модель ВДТ з тиристорним керуванням

Очевидно, що ступінь несинусоїдальності буде залежати від кута α регулювання вентилів і ступеня насичення магнітної системи. При α = 0 °

несинусоидальность параметрів режиму визначається лише нелинійністю параметрів трансформатора і навантаження. Розрахунки характерних режимів роботи схеми при різних кутах регулювання вентилів виконані в програмі Scilab.

Для оцінки ступеня несинусоїдальності проведено аналіз гармонійного складу параметрів режиму схеми.

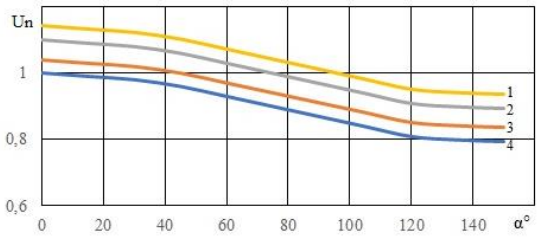


Рис. 5. Залежність відносного значення вихідної напруги від кута регулювання вентилів:

1, 2, 3, 4 - для вхідної напруги, рівної 1, 0.95, 0.9, 0.85 від Uном

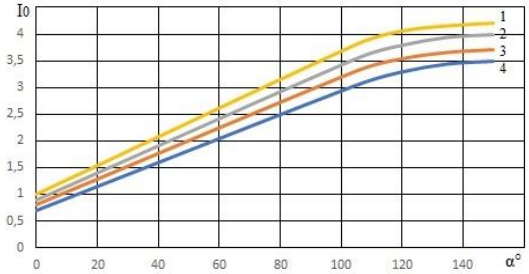


Рис. 6. Залежність відносного значення струму намагнічування від кута регулювання вентилів:

1, 2, 3, 4 - для вхідної напруги, рівної 1, 0.95, 0.9, 0.85 від $U_{ном}$

У таблиці наведено результати розкладання струму навантаження в гармонійний ряд.

1. Результати розкладання струму навантаження в гармонійний ряд

I_1/I_k ·100 % \ α°	0	45	90	135	180
I (1)	100	97,2	90,5	86,9	82
I (3)	0	5,31	7,06	9,7	12,9
I (5)	0	2,1	3,53	4,08	4,4
I (7)	0	0,9	1,23	1,35	1,57

На рис. 5 наведені характеристики діючого значення вихідної напруги схеми при зміні вхідної напруги на 15 % від $U_{ном}$ і регулювання α від 0 до 180 °.

На рис. 6 показані залежності діючого значення струму намагнічування I_0 від кута регулювання вентилів.

Висновки і перспективи. За результатами досліджень можна зробити такі висновки:

1) Досліджувана схема дозволяє плавно регулювати діюче значення вихідної напруги при зміні вхідної напруги і навантаження. Параметри режиму 'схеми є в загальному випадку несинусоїдальними функціями часу.

2) Струм намагнічування вольтододавального трансформатора зростає зі збільшенням кута регулювання і при повністю закритих вентилях істотно перевершує номінальний струм холостого ходу трансформатора. Також значно зростає напруга на вентилях і затискачах ВДТ. При повністю закритих вентилях вона перевершує номінальну напругу установки приблизно в 3-4 рази. Тому регулювання можна проводити лише в обмеженому діапазоні зміни кута регулювання.

3) Для ефективного регулювання у всьому діапазоні необхідно застосовувати схеми, в яких виключається можливість тривалої роботи трансформатора без розмагнічуючого контуру. Це, наприклад, схеми з індуктивними ключами або з триобмотковими ВДТ.

Список літератури

1. Ясутис А. В. Анализ работы вольтодобавочного трансформатора с тиристорным управлением. Сб. работ Всесоюзного. заочн. политехнич. ин-та-М., 1973. Вып.84. С. 146-156.

2. Говоров Ф. П. Режимы работы и особенности елетромагнитних процессов вольтодобавачного трансформатора с тиристорным управлением: Дис. канд.тех.наук.: 05.09.01 Л, 1983. - 229 с.

3. Говоров Ф. П., Толкунов В. П. Магнитные потоки и индуктивности вольтодобавочного трансформатора. Электротехника. 1995. №5. С. 21-25.

4. Суслов В. М., Бошняга В. А. Методика визначення параметрів схеми заміщення багатообмотувальних трансформатора у вигляді багатопроменевої зірки. «Problemele energeticii regionale» 2019. №2 (37). С. 13-19.

5. Голуб І. В., Зайцев Д. А., Тирш М. С. Режими джерела реактивної потужності, керованого фазорегулювальні трансформатором. «Problemele energeticii regionale». 2018. №2 (37). С. 62-69.

References

1. Yasutis, A. V. (1973). Analiz raboty vol'todobavochnogo transformatora s tiristornym upravleniyem [Analysis of the operation of a voltage-transformer with thyristor control]. Sb. rabot Vsesoyuznogo. zaochn. politekhnich. in-ta, 84, 146-156.

2. Govorov, F. P. (1983). Rezhimy raboty i osobennosti eletromagnitnikh protsessov vol'todobavachnogo transformatora s tiristornym upravleniyem [Speeches Modes of operation and peculiarities of electromagnetic processes of a voltage-suppressing transformer with thyristor control]: Dis. kand.tekh.nauk.: 05.09.01, 229.

3. Govorov, F. P., Tolkunov, V. P. (1995). Magnitnyye potoki i induktivnosti vol'todobavochnogo transformatora [Magnetic fluxes and inductances of a high-voltage transformer]. Elektrotekhnika, 5, 21-25.

4. Suslov, V. M., Boshniaha, V. A. (2019). Metodyka vyznachennia parametriv skhemy zamishchennia bahatoobmotuvalnykh transformatora u vyhliadi bahatopromenevoi zirky [A technique for determining the parameters of the substitution scheme for a multi-winding transformer in the form of a multi-beam star.]. «Problemele energeticii regionale», 2 (37), 13-19.

5. Holub, I. V., Zaitsev, D. A., Tyrsh, M. S. (2018). Rezhymy dzherela reaktyvnoi potuzhnosti, kerovanoho fazorehuliuvalni transformatorom [Modes of reactive power source controlled by a phase-controlled transformer]. «Problemele energeticii regionale», 2 (37), 62-69.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Ф. П. Говоров, В. Ф. Говоров, А. К. Киндинова

Аннотация. *Приведены расчетно-экспериментальные исследования работы вольтодобавочного трансформаторов с тиристорным управлением в различных режимах. Установлен характер изменения модуля, фазы и гармонических составляющих ЭДС и токов в обмотках трансформатора, дана их количественная оценка и рекомендации по управлению его режимами работы.*

Для количественной оценки процессов в ВДТ проведены расчетные исследования с использованием программы Scilab.

С целью упрощения расчета и повышения устойчивости решения задачи на структурной математической модели в дальнейшем учтено ЭДС рассеяния как ЭДС одной из обмоток трансформатора. Такое упрощение практически не скажется на точности расчетов, поскольку в реальных условиях ее величина незначительна по сравнению с номинальным напряжением нагрузки.

Для воспроизведения зависимости i0=f(Ψ) применен функциональный преобразователь с методической погрешностью (кусочно-линейная аппроксимация). Кривая i0=f(Ψ) соответствует кривой намагничивания, снятой по мгновенным значением со стороны последовательной обмотки. Характеристики вентилей приняты идеальными. В закрытом состоянии характеристики управляемых вентилей моделируются по предложенному схемному принципу, путем введения на вход структурного звена второго уравнения системы (2) напряжения - Ub(i), согласно напряжения на управляемых вентилях.

Для оценки степени несинусоидальность проведен анализ гармонического состава параметров режима схемы.

Для эффективного регулирования во всем диапазоне следует применять схемы, в которых исключается возможность длительной работы трансформатора без размагничивающего контура. Это, например, схемы с индуктивными ключами или трехобмоточный ВДТ.

Ключевые слова: ***вольтодобавочный трансформатор, тиристорное управление, магнитная система***

STUDY OF THE OPERATION OF BOOSTER TRANSFORMERS IN STATIC MODES

P. Hovorov, V. Hovorov, A. Kindinova

Abstract. *Design and experimental studies of the operation of booster transformer thyristor-controlled transformers in different modes are presented. The nature of the change of the module, phase and harmonic components of EMF and currents in the transformer windings is determined, their quantitative estimation and recommendations for management of its modes of operation are given.*

To quantify processes in BT, computational studies were conducted using the Scilab program.

In order to simplify the calculation and increase the stability of the solution of the problem on the structural mathematical model, the scattering EMF is further taken into account as the EMF of one of the transformer windings. Such simplification will practically not affect the accuracy of calculations, since in real conditions its value is insignificant in comparison with the nominal load voltage.

For playback, depending on i0 = f (Ψ), a functional converter with a methodical error (piecewise linear approximation) was used. The curve i0 = f (Ψ) corresponds to the magnetization curve taken instantaneously by the sequential winding. Valve characteristics are considered perfect. In the closed state, the characteristics of the controlled valves are modeled according to the proposed circuit principle, by inputting to the input of the structural unit of the second equation of the system (2) voltage - Ub (i), respectively, the voltage on the controlled valves.

To assess the degree of non-sinusoidality, an analysis of the harmonic composition of the scheme mode parameters was performed.

For effective regulation throughout the range, the schemes in which. eliminates the possibility of long-term operation of the transformer without demagnetizing circuit. These are, for example, circuits with inductive switches or with three-winding BT.

Key words: ***booster transformer, thyristor control, magnetic system***