

ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРНО-ВИПРЯМНОГО БЛОКУ УСТАНОВКИ ВІДЦЕНТРОВОЇ ОЧИСТКИ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ОЛИВИ

Тарасова В. В.¹, Нечаус А. О.², Гнатов А. В.², Аргун Щ. В.²,
Шимук Д. С.¹, Бикова О. В.²

¹Харківський національний університет Повітряних сил,
ім. Івана Кожедуба, Інститут цивільної авіації,

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Розроблено структурну схему трансформаторно-випрямного блоку з автоматизованою системою керування вихідною напругою установки для очищення трансформаторної оливи на базі електропривода підвищеної частоти. Виконані розрахунки передаточних функцій елементів запропонованої автоматизованої системи керування трансформаторно-випрямного блоку та досліджено її динамічні характеристики.*

***Ключові слова:** силовий трансформатор, трансформаторна олива, автоматизована система керування, передаточна функція, динамічні характеристики.*

Вступ

Правильне функціонування, безпека роботи і термін служби трансформаторів безпосередньо залежать від стану їх системи ізоляції, яка в основному складається з шарів спеціального паперу і трансформаторної ізоляційної оливи [1]. Трансформаторна олива забезпечує охолодження, електричну міцність і захист паперової ізоляції. В період експлуатації трансформатора відбуваються процеси деградації в паперовій та масляній ізоляції. Очищення трансформаторної оливи (ТО) є одним з важливих технічних завдань, вирішення якого допоможе уникнути значних витрат матеріальних та енергетичних ресурсів. У зв'язку із цим, зростає інтерес до пошуку шляхів вирішення цієї проблеми.

Автори даної роботи пропонують для силової установки очищення ТО використовувати електропривід підвищеної частоти, який живиться від трансформаторно-випрямного блоку (ТВБ) з автоматичною системою керування (АСК) вихідною напругою.

Аналіз публікацій

Погіршення екології і зменшення енергетичних ресурсів вимагає від сучасних науковців не лише розробки і впровадження нового енергоефективного обладнання, але і удосконалення існуючого [2–4].

У теперішній час для очищення відпрацьованої ТО використовують декілька методів [5, 6]. Наприклад, очищення за допомогою нафтових сепараторів з робочою частотою 50 Гц; відстоювання оливи з наступним зливом верхнього (очищеного) шару; очи-

щення оливи з наступним зливом верхнього (очищеного) шару і проведення хімічних реакцій для відновлення її властивостей [7].

Але найбільш перспективним способом очищення є саме нафтові сепаратори [8, 9], при використанні яких покращуються основні показники установок очищення, а саме: якість очищення та продуктивність, зручність експлуатації, що в першу чергу відноситься до безперервного викиду відходів.

Як вказано в [10], найбільший вплив на працездатність сепараторів має їх привід. Проведений аналіз літератури показав, що для живлення електроприводів сепараторів різного призначення на теперішній час використовується змінний струм промислової частоти 50 Гц. Але відомо, що джерело живлення з більшою частотою струму, а саме 400 Гц, є перспективним не тільки з точки зору покращення масо-габаритних показників сепаратора [11], але й також обов'язково зменшує явище дисбалансу та покращує перехідні процеси при пуску та гальмуванні сепаратору.

Таким чином, обґрунтування створення ефективної установки для відцентрового очищення ТО фактично пов'язане з використанням в якості устаткування електроприводу з частотою живлення 400 Гц.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розрахунок функціональної схеми ТВБ, розрахунок передаточних функцій та динамічних характеристик автоматичної системи керування трансформаторно-випрямного блоку установки для відцент-

рового очищення ТО з електроприводом підвищеної частоти.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

– розробити функціональну схему трансформаторно-випрямний блоку з автоматичною системою керування вихідною напругою для установки очищення ТО;

– провести розрахунки передаточних функцій елементів АСК;

– провести розрахунок динамічних характеристик АСК ТВБ.

Функціональна схема ТВБ

Запропонована функціональна схема ТВБ з АСК напругою наведена на рис. 1.

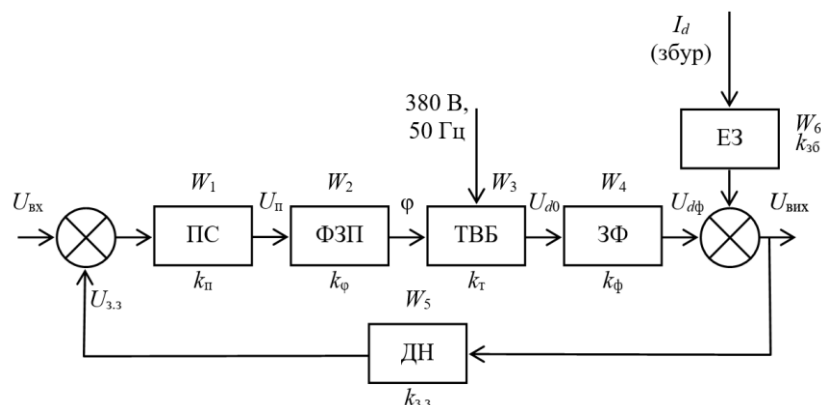


Рис. 1. Функціональна схема ТВБ з автоматичною системою керування напругою

На рис. 1 використані наступні умовні позначення:

ПС – підсилювач;

ФЗП – фазозсувний пристрій;

ТВБ – трансформаторно-випрямний блок;

ЗФ – згладжуючий фільтр;

ДН – датчик напруги;

ЕЗ – елемент, що враховує збурення;

$U_{вх}$ – керуюча напруга АСК;

I_d – струм навантаження ТВБ;

$U_п$ – напруга, що знімається з підсилювача;

φ – кут відкриття вентилів ТВБ;

U_{d0} – напруга на вході ТВБ, без струму навантаження;

$U_{dф}$ – напруга на виході фільтра;

$k_п$ – коефіцієнт передачі підсилювача;

$k_ф$ – коефіцієнт передачі ФСП;

$k_т$ – коефіцієнт передачі ТВБ;

$k_ф$ – коефіцієнт передачі фільтру;

$k_{з.з}$ – коефіцієнт передачі елемента збурення;

$k_{з.з}$ – коефіцієнт від'ємного зворотного зв'язку.

Далі більш детально розглянемо основні передаточні функції елементів АСК, що представлені на рис. 1.

Передаточні функції елементів АСК

Підсилювач. Підсилювач, що використовується в АСК, зазвичай виконується на транзисторах і являє собою підсилювач постійного струму охоплений від'ємним зворотнім зв'язком як показано на рис. 2.

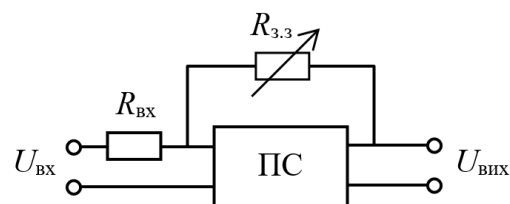


Рис. 2. Підсилювач постійного струму охоплений від'ємним зворотнім зв'язком

Коефіцієнт передачі підсилювача регулюється у широких межах зміною опорного зворотного зв'язку $R_{з.з}$ за співвідношенням:

$$k_п = R_{з.з} / R_{вх}.$$

Передаточна функція підсилювача в операторній формі має наступний вигляд:

$$W_1(p) = \frac{x_{вих}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{U_п(p)}{U'_{вх}(p)} = k_п. \quad (1)$$

Тобто це безінерційна ланка.

Фазозсувний пристрій. Фазозсувний пристрій являє собою елемент, який забезпечує зміну фази відносно його вихідної напруги на кут φ , що дозволяє змінити кут відкритого стану вентилів ТВБ, тим самим регулюється значення вихідної напруги.

Даний пристрій працює за «вертикальним» принципом і складається з генератора

пилкоподібної напруги і пристрою для порівняння його напруги з напругою керування.

Аналіз принципу дії ФСП тиристорного регулятора показує, що він є практично безінерційним елементом АСК. Таким чином, його передаточна функція в операторній формі має наступний вигляд:

$$W_2(p) = \frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{\varphi(p)}{U_{\text{п}}(p)} = k_{\varphi}, \quad (2)$$

де k_{φ} – коефіцієнт передачі ФСП.

Чисельне значення коефіцієнту передачі ФСП може бути визначене, як відношення номінальної величини кута відкриття вентилів до номінальної величини напруги на вході ФЗП і представлено у вигляді:

$$k_{\varphi} = \varphi_{\text{н}} / U_{\text{пн}}. \quad (3)$$

Трансформатор живлення випрямного блоку. Він являє собою електромагнітний апарат, що складається з індуктивностей L_1 , L_0 , L_2 з осердями та резисторів R_1 , R_0 , R'_2 у колах індуктивностей. Таким чином він має можливість згладжувати стрибки струму. Тобто цей апарат має електромагнітну сталу часу T_T .

Визначимо методику розрахунку електромагнітної сталої часу трансформатора. Для цього використаємо схему заміщення трансформатора для однієї фази.

Технічні данні необхідні для визначення елементів схеми заміщення трансформатора, що були отримані раніше:

$$\begin{aligned} U_1 &= 380 \text{ В}; & w_2 &= 42; \\ I_1 &= 1,05 \text{ А}; & R_1 &= 12,35 \text{ Ом}; \\ I_0 &= 0,22 \text{ А}; & R_2 &= 10,85 \text{ Ом}; \\ I_{0a} &= 0,014 \text{ А}; & X_k &= 3,9 \text{ Ом}; \\ I_2 &= 27,3 \text{ А}; & X_1 = X'_2 &= 1,95 \text{ Ом}; \\ I'_2 &= 1,2 \text{ А}; & R_{\text{дн}} &= 0,9 \text{ Ом}; \\ w_1 &= 955; & R'_{\text{дн}} &= 155 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

$\varphi_0 = 84,6$ град – кут між вектором напруг U_1 і вектором струму неробочого ходу I_0 .

Оскільки кут φ_0 близький до 90° можна сказати, що струм неробочого ходу має чисто індуктивний характер і можна зробити припущення, що активний опір намагнічуючого кола $R_0 \approx 0$.

Тоді реактивний опір намагнічуючого кола буде:

$$X_0 = \frac{U_1}{I_0} = \frac{380}{0,22} = 1727 \text{ Ом},$$

а відповідні індуктивності:

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{X_0}{2\pi f_1} = \frac{1727}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 5,5 \text{ Гн}; \\ L_1 &= \frac{X_1}{2\pi f_1} = \frac{1,95}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \\ L'_2 &= L_1 = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \end{aligned}$$

Визначення електромагнітної сталої часу T_T проведемо, використовуючи Т-подібну схему заміщення трансформатора (рис. 3).

Для двох контурів схеми за другим законом Кірхгофа та вузла схеми за першим законом Кірхгофа складемо наступні рівняння:

$$\begin{aligned} i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_0 \frac{di_0}{dt} &= u_1; \\ i'_2 (R'_2 + R'_{\text{дн}}) + L'_2 \frac{di'_2}{dt} + L_0 \frac{di_0}{dt} &= e'_2; \\ i_0 &= i_1 + i'_2. \end{aligned}$$

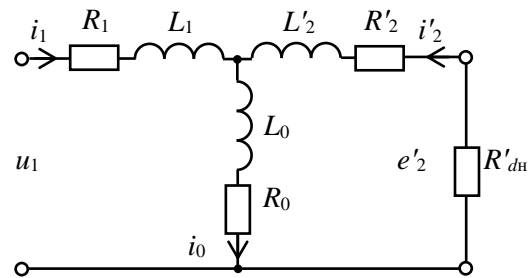


Рис. 3. Т-подібна схема заміщення трансформатора

Переходячи до операторної форми запису рівнянь отримаємо:

$$\begin{aligned} I_1(p)R_1 + L_1 p I_1(p) + L_0 p I_0(p) &= U_1(p); \\ I'_2(p)(R'_2 + R'_{\text{дн}}) + L'_2 p I'_2(p) + & \\ + L_0 p I_0(p) &= E'_2(p); \\ I_0(p) &= I_1(p) + I'_2(p). \end{aligned}$$

Вирішивши рівняння разом відносно струму $I_0(p)$ отримаємо:

$$\begin{aligned} [(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + T_{02} p(T_1 p + 1) + & \\ + T_{01} p(T_2 p + 1)] I_0(p) &= \\ = \frac{U_1(p)(T_2 p + 1)}{R_1} + \frac{E'_2(p)}{R'_2 + R'_{\text{дн}}}, & \end{aligned}$$

де $T_1 = L_1/R_1$; $T_{01} = L_0/R_1$;

$$T_2 = L'_2 (R'_2 + R'_{\text{дн}});$$

$$T_{02} = L_0 / (R'_2 + R'_{дн}).$$

Рівняння являє собою диференціальне рівняння у операторній формі, яке характеризує закон зміни намагнічуючого струму трансформатора $I_0(p)$ при підключенні ТВБ до живлячої мережі.

Характеристичне рівняння отримаємо прирівнявши ліву частину до нуля:

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + T_{02} p(T_1 p + 1) + T_{01} p(T_2 p + 1) = 0$$

або, якщо прийняти

$$\begin{aligned} a_2 &= T_1 T_2 + T_{01} T_2 + T_{02} T_2; \\ a_1 &= T_1 + T_2 + T_{01} + T_{02}; \\ a_2 p^2 + a_1 p + 1 &= 0. \end{aligned}$$

Знайдемо чисельні значення сталих часу T_1 , T_2 , T_{01} , T_{02} , використовуючи раніше отримані величини опорів та індуктивностей:

$$\begin{aligned} T_1 &= L_1 / R_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \\ T_{01} &= L_0 / R_1 = 0,45 \text{ с}; \\ T_2 &= L'_2 / (R'_2 + R'_{дн}) = 0,0373 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \\ T_{02} &= L_0 / (R'_2 + R'_{дн}) = 0,034 \text{ с}. \end{aligned}$$

Беручи до уваги отримані відношення знайдемо коефіцієнти a_1 і a_2 :

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,484 \text{ с}; \\ a_2 &= 3,3 \cdot 10^{-6} \approx 0, \end{aligned}$$

тоді характеристичне рівняння буде мати вигляд:

$$0,484 \cdot p + 1 = 0.$$

Знайдемо корінь рівняння:

$$p_1 = -1/0,484 = -2,1.$$

Тоді електромагнітна стала трансформатора буде дорівнювати:

$$T_T = |1/p_1| = 0,484.$$

Аналізуючи сталі часу первинного та вторинного кіл, а також кола неробочого ходу трансформатора можна зробити висновок про те, що слід врахувати тільки сталі часу

T_{01} і T_{02} . Тоді стала часу трансформатора T_T визначається у вигляді відношення:

$$T_T = T_{01} + T_{02} = \frac{L_0}{R_1} + \frac{L_0}{R'_2 + R'_{дн}}.$$

Видно, що стала часу максимальна при короткому замиканні ТВБ, оскільки при $R'_{дн} = 0$:

$$T_{Т.кз} = L_0 / R_1 + L_0 / R'_2.$$

На неробочому ході $R'_{дн} = \infty$, тоді стала часу мінімальна:

$$T_{Т.нх} = L_0 / R_1.$$

Тобто значення сталої часу T_T треба вираховувати для кожного значення навантаження ТВБ.

Проведений аналіз показує, що ТВБ є аперіодичною ланкою середнього порядку і його передаточна функція визначається у вигляді відношення:

$$W_3(p) = \frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{U_d(p)}{\varphi(p)} = \frac{k_T}{T_T p + 1},$$

де $k_T = U_{d0} / \varphi_n$ – коефіцієнт передачі ТВБ;

φ_n – номінальне значення кута відкривання вентилів;

U_{d0} – напруга неробочого ходу ТВБ.

Згладжуваний фільтр. Для згладження пульсацій вихідної напруги було обрано Г-подібний фільтр. Він має наступні технічні данні: $L_\phi = 0,5$ мкГ; $C_\phi = 2000$ мкФ; стала часу $T_\phi = 10^{-3}$ с.

Передаточна функція фільтру являє собою аперіодичну ланку першого порядку:

$$W_4(p) = \frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{U_{d\phi}(p)}{U_{d0}(p)} = \frac{k_\phi}{T_\phi p + 1}.$$

Та значення сталої часу $T_\phi = L_\phi C_\phi = 10^{-3}$, таке мале, що ним можна знехтувати. Тоді передаточна функція фільтру перетворюється в безінерційну ланку:

$$W_4(p) = \frac{U_{d\phi}(p)}{U_{d0}(p)} = k_\phi,$$

де $k_\phi = 0,92 \dots 0,98$ коефіцієнт передачі фільтру.

Значення $k_\phi < 1$ показує, що враховуються спади напруги на фільтрі (8-2 % від U_n). Чисельне значення k_ϕ визначається конструктивними даними індуктивності.

Ланка від'ємного зворотного зв'язку. Як ланку від'ємного зворотного зв'язку використано датчик напруги безінерційного типу на стабілітронах, що забезпечує на виході напругу зворотного зв'язку $U_{3.3}$, достатню для створення прийнятого значення коефіцієнта зворотного зв'язку.

Передаточна функція даної ланки дорівнює:

$$W_5(p) = \frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{U_{3.3}(p)}{U_{\text{вих}}(p)} = k_{3.3} = 0,8,$$

де $k_{3.3} = 0,8$ – коефіцієнт зворотного зв'язку. Приймаємо попередньо. Рекомендовані межі $k_{3.3} = 0,6 \dots 0,85$.

Передаточна функція елемента врахування збурення (струму I_d). Елемент врахування збурення дозволяє оцінити відхилення вихідної напруги U_d при впливі на ТВБ струму навантаження I_d , тобто це «теоретичний» елемент. Він повинен врахувати спад напруги в трансформаторі і спад напруги на вентилях. Спад напруги в трансформаторі $\Delta U_{\text{тр}}$ пропорційний струму I_d , а спад на вентилях $\Delta U_{\text{в}}$ не залежить від струму, тобто $\Delta U_{\text{в}} = \text{const}$.

Таким чином, спад напруги ТВБ у розімкненій АСК визначається у вигляді:

$$\Delta U_{\text{дп}} = \Delta U_{\text{в}} + \Delta U_{\text{тр}} = \frac{2\Delta U_{1\text{в}}}{k_\phi} + k_{3\phi} I_{\text{дн}},$$

де $\Delta U_{1\text{в}}$ – спад напруги на одному вентилі. Визначається за довідковими даними.

$k_{3\phi} = \Delta U_{\text{тр}} / I_{\text{дн}}$, В/А – коефіцієнт передачі елемента збурення.

$$\Delta U_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{к}} \% \cdot U_{\text{дк}}}{100} - \text{номінальна величина}$$

спаду напруги трансформатора під навантаженням.

В замкненій системі АСК за рахунок використання підсилювача спад напруги на виході ТВБ визначається як відношення:

$$\Delta U_{\text{д3}} = \Delta U_{\text{д3}} / k_{3.с},$$

де $k_{3.с} = 1 + k_{\text{р.с}} k_{3.3}$ – коефіцієнт передачі замкненої АСК;

$k_{\text{р.с}} = k_{\text{п}} k_\phi k_{\text{т}} k_\phi$ – коефіцієнт передачі розі-

мкненої АСК;

$k_{3.3} = 0,8$ – коефіцієнт зворотного зв'язку (прийнятий попередньо).

Розрахунок динамічних характеристик АСК ТВБ

Визначимо передаточну функцію розімкненої АСК:

$$W_{\text{р.с}}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) = \\ = k_{\text{п}} k_\phi \frac{k_{\text{т}}}{T_{\text{т}} p + 1} k_\phi = \frac{k_{\text{р.с}}}{T_{\text{т}} p + k_{3.с}}$$

Знайдемо чисельне значення коефіцієнта передачі елемента в АСК:

$k_{\text{п}} = U_{\text{п}} / U_{\text{вх}} = 6,5$ – приймаємо попередньо;

$$k_\phi = \phi_n / U_{\text{пн}} = 2,25 \text{ град/В},$$

де $\phi_n = 45$ град – кут відкриття вентиля для номінального значення напруги ТВБ $U_{\text{д0}} = 30$ В;

$U_{\text{к.н}} = 20$ В – номінальна величина керуючої напруги, що подається у ФЗП;

$$U_{\text{к.н}} = U_{\text{вх}} k_{\text{п}} = 20 \text{ В};$$

$U_{\text{вх}} = 3,12$ В номінальне значення вхідної напруги АСК;

$$k_{\text{т}} = U_{\text{д0}} / \phi_n = 0,67 \text{ град/В};$$

$$k_\phi = U_{\text{д}} / U_{\text{д0}} = 0,98 - \text{попередньо.}$$

Визначимо:

$$k_{\text{р.с}} = k_{\text{п}} k_\phi k_{\text{т}} k_\phi = 6,5 \cdot 2,25 \cdot 0,67 \cdot 0,98 = 9,6.$$

Перевіримо величину напруги керування:

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{д0}} / k_{\text{р.с}} = 30 / 9,6 = 3,13 \text{ В.}$$

Це значення відповідає прийнятому значенню напруги $U_{\text{вх}}$ на початку.

Замінімо вираз для передаточної функції в чисельному вигляді:

$$W_{3.с}(p) = \frac{k_{\text{р.с}}}{T_{\text{т}} p + k_{3.с}} = \frac{9,6}{484 p + 8,7},$$

де $T_{\text{т}}$ – електромагнітна стала часу трансформатора.

Диференціальне рівняння АСК має вигляд:

$$(T_{\text{т}} p + k_{3.с}) U_{\text{п}}(p) = k_{\text{р.с}} U_{\text{д}}(p).$$

Характеристичне рівняння АСК:

$$T_1 p + k_{3,c} = 0.$$

Якщо підставити чисельне значення коефіцієнтів T_1 і $k_{3,c}$ отримаємо:

$$0,484p + 8,7 = 0.$$

Вирішивши характеристичне рівняння знайдемо корінь p_1

$$p_1 = -8,7/0,484 = -18.$$

Визначаємо закон зміни вихідної напруги при пуску АСК $U_d = f(t)$ на неробочому ході:

$$U_d(t) = U_{dv} (1 - e^{p_1 t}) = 30(1 - e^{-18t}).$$

де $U_{dv} = U_{d0} = 30$ В – встановлене значення вихідної напруги при пуску АСК на неробочому ході.

Якщо пуск виконується під навантаженням, то напруга:

$$U_{dc} = U_{d0} - \Delta U_{d3} = 30 - 0,46 = 29,34 \text{ В},$$

$$\text{де } \Delta U_{d3} = \frac{\Delta U_{dp}}{k_{3,c}} = \left(\frac{\frac{2\Delta U_{1b} + k_{3\phi} I_{dн}}{k_{\phi}}}{k_{3,c}} \right) = 0,46 \text{ В};$$

$\Delta U_{1b} = 0,75$ В, спад напруги на вентилі ВКДУ – 150, не залежно від величини струму вентиля;

$k_{3\phi} = \Delta U_{tp} / I_{dн} = 2,5/33,3 = 0,075$ В/А – коефіцієнт передачі ланки збурення;

$$\Delta U_{tp} = \frac{U_{к \%} \cdot U_{dk}}{100} = 2,5 \text{ В} - \text{спад напруги}$$

на виході трансформатору $I_d = I_{dн}$.

Рівняння перехідного процесу вихідної напруги U_d при пуску ТВБ під номінальним навантаженням має вигляд:

$$U_d(t) = U_{dv} (1 - e^{p_1 t}) = 29,54(1 - e^{-18t}).$$

Результати розрахунків перехідного процесу за даним виразом наведені в табл. 1 і на рис. 4.

Таблиця 1 – Результати розрахунку перехідного процесу

$t, \text{ с}$	0	0,02	0,04	0,08	0,16	0,24
$U_d(t), \text{ В}$	0	9	15,3	23,8	28,5	29,55

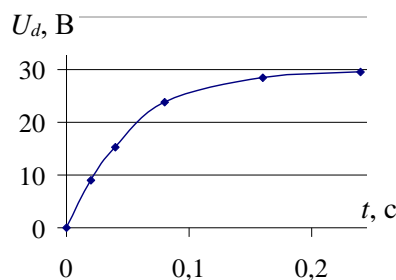


Рис. 4. Графік перехідного процесу $U_d(t)$

Статична точність стабілізації вихідної напруги ТВБ дорівнює:

$$\Delta U_{d3} = 0,46 \text{ В}.$$

Або може бути визначена у відсотках:

$$\Delta U_{d3\%} = \frac{\Delta U_{d3} \cdot 100\%}{U_{d0}} = \frac{0,46 \cdot 100}{30} = 1,5 \%.$$

За необхідності збільшення точності стабілізації слід збільшити значення коефіцієнта передачі підсилювача $k_{п}$.

Крім збільшення точності стабілізації вихідної напруги ТВБ збільшення $k_{п}$ приведе до збільшення надійності системи стабілізації напруги.

Для побудови графіку перехідного процесу користуються рядом значень часу t і за рівнянням перехідного процесу розраховують напругу $U_d(t)$.

Висновки

На теперішній час промисловість України серійно не випускає перетворювачі частоти з 50 Гц на 400 Гц. Як відомо, існують тільки окремі зразки і розробки для джерел невеликої потужності. Проте слід відмітити, що на ринку наявні перетворювачі імпортного виконання, які не завжди підходять за технічними характеристиками, і до того ж мають значну вартість. Саме тому, розробку перетворювача змінного трифазного струму напругою 220 В з частотою 50 Гц у змінний трифазний струм напругою 220 В з частотою 400 Гц слід вважати актуальною. Така частота окрім забезпечення необхідних характеристик нафтового сепаратора дозволяє знизити масо-габаритні показники та забезпечити високу надійність роботи установки очищення трансформаторної оливи.

В роботі розглянута функціональна схема АСК напругою ТВБ, у якій точність керування вихідної напруги прямопропорційно за-

лежить від коефіцієнту передачі підсилювача та дозволяє підвищити надійності роботи системи керування.

В системі можливе виникнення різних типів перехідних процесів: періодичного, або аперіодичного. Це визначається видом коренів характеристичного рівняння, які в свою чергу визначаються параметрами ТБВ ($L_1, R_1, L_2, R_2, L_0, R$ та іншими).

Розроблена структурна схема ТБВ дозволяє визначити передаточну функцію АСК, скласти характеристичне рівняння перехідного процесу, визначити його корені та розрахувати перехідний процес для будь-яких умов.

Література

1. Mačuzić I., Jeremić B. Modern Approach to Problems of Transformer Oil Purification. *Tribology in industry*, Kragujevac. 2002. Вип. 24.
2. Migal V., Arhun Shch., Hnatov A., та ін. Substantiating the Criteria For Assessing the Quality of Asynchronous Traction Electric Motors in Electric Vehicles and Hybrid Cars. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*. 2019. Вип. 10, № 36. С. 989–999.
3. Patlins A., Hnatov A., Arhun S., та ін. Design and research of constructive features of paving slabs for power generation by pedestrians. *Transportation Research Procedia*. 2019. Вип. 40. С. 434–441.
4. Hnatov A., Argun S., Tarasov K., та ін. Researching the Model of Electric Propulsion system for bus with the Matlab Simulink: *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 07. October. 19. С. 1–6.
5. Юсупов Д. Т., Ботиров А. Н., Рuzиев С. Б. Эффективность существующих методов регенерации трансформаторного масла. *Молодой ученый*. 2017. № 24. С. 227–229.
6. Ихсанова А. И., Гайнутдинова А. М. Очистка и регенерация трансформаторного масла. *Аллея науки*. 2016. № 4. С. 292–294.
7. Speight J., Exall D. I. *Refining used lubricating oils*: CRC Press, 2014.
8. Білецький В. С., Орловський В. М., Вітрик В. Г. Основи нафтогазової інженерії: підручник для студентів вищих навчальних закладів: Львів: Новий Світ - 2000, 2019. 416 с.
9. Малахов Ю. В., Шевченко Н. Е., Вороб'єв І. Е. О стратегии и основных направлениях развития электроэнергетики Украины в первой половине XXI века. *Энергетика и электрификация*. 2001. № 7. С. 8–14.
10. Hnatov A., Arhun Shch., Bagach R., та ін. Electrical power unit of the transformer oil centrifugal cleaning unit. *Avtomobil'nyy transport*. 2021. Вип. 48. (accepted).
11. Толубко В. Б. Электропостачання і електрообладнання військових об'єктів: [підруч. у 2 ч.]. Харків.: ХВУ, 1998– Ч. 2– 500 с. 1998.

References

1. Mačuzić I., Jeremić B. (2002) Modern Approach to Problems of Transformer Oil Purification. *Tribology in industry*, Kragujevac. 24.
2. Migal V., Arhun Shch., Hnatov A. (2019) Substantiating the Criteria For Assessing the Quality of Asynchronous Traction Electric Motors in Electric Vehicles and Hybrid Cars. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*. 10. 36. 989–999.
3. Patlins A., Hnatov A., Arhun S. (2019) Design and research of constructive features of paving slabs for power generation by pedestrians. *Transportation Research Procedia*. 240. 434–441.
4. Hnatov A., Argun S., Tarasov K. (2019) Researching the Model of Electric Propulsion system for bus with the Matlab Simulink: *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 07. October. 19. 1–6.
5. Yusupov D. T., Botirov A. N., Ruziev S. B. (2017) Effektivnost suschestvuyuschih metodov regeneratsii transformatornogo masla. [The effectiveness of existing methods of regeneration of transformer oil]. *Molodoy ucheniy*. 24. 227–229. [in Russian]
6. Ihsanova A. I., Gaynutdinova A. M. (2016) Ochistka i regeneratsiya transformatornogo masla. [Purification and regeneration of transformer oil]. *Alleya nauki*. 4. 292–294. [in Russian]
7. Speight J., Exall D. I. (2014) *Refining used lubricating oils*: CRC Press.
8. Biletskyi V. S., Orlovskiy V. M., Vitryk V. H. (2019) *Osnovy naftohazovoi inzhenerii: pidruchnyk dlia studentiv vyshchyykh navchalnykh zakladiv* [Fundamentals of oil and gas engineering: a textbook for students of higher educational institutions] Lviv: Novyi Svit. [in Ukrainian]
9. Malahov Yu. V., Shevchenko N. E., Vorob'ov I. E. (2001) O strategii i osnovnih napravleniyah razvitiya elektroenergetiki Ukrainyi v pervoy polovine XXI veka. [On the strategy and main directions of development of the electric power industry in Ukraine in the first half of the XXI century]. *Energetika i elektrifikatsiya*. 7. 8–14. [in Russian]
10. Hnatov A., Arhun Shch., Bagach R. (2021) Electrical power unit of the transformer oil centrifugal cleaning unit. *Avtomobil'nyy transport*. 48. (accepted).
11. Tolubko V. V. (1998) *Elektropostachannya i elektroobladnannya viyskovykh obyektiv: Pidruchnik. P. 2.* [Power supply and electrical equipment of military facilities] KhVU, 500 [in Ukrainian].

Тарасова Валентина Всеволодівна¹, к.т.н., доц. каф. електротехнічних систем, тел. +38 066-828-47-31, val.vs.tarasova@gmail.com.

Гнатів Андрій Вікторович², д.т.н., зав. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 066-743-08-87, kalifus76@gmail.com, orcid: 0000-0003-0932-8849

Аргун Щасяна Валіковна², д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 099-378-04-51, shasyana@gmail.com, orcid: 0000-0001-6098-8661

Нечаус Андрій Олександрович², к.т.н., доц. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 067-777-02-24, a.nechaus@gmail.com.

Шимук Дмитро Степанович¹, к.т.н., доц. каф. електротехнічних систем, тел. +38 066-458-81-29, shimukds@gmail.com.

Бикова Олена Вікторівна², зав. лаб каф. автомобільної електроніки, тел. +38 066-559-30-53, ae.hnadu@gmail.com.

¹Харківський національний університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба, Інститут цивільної авіації, 61023, м. Харків, вул. Сумська 77/79.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Functional scheme of the transformer-rectifier unit of the centrifugal oil cleaning installation

Annotation. Problem. The reduction of reliability, economical and mass-dimensional indicators is one of available ways for centrifugal cleaning transformer oil installations, which based on electric drives with increased frequency. In addition to the development and calculation of the power scheme of the installation, the issue of developing an calculation power supply system from the industrial power system is relevant. In this case, the task of developing and researching a voltage and frequency converter, which is an intermediate link between the industrial power system and the centrifugal oil cleaning installation and provides the specified parameters of electricity, requires the solution of additional partial problems. **Goal.** The goal is to develop and study the functional scheme of the transformer-rectifier unit with an automated output voltage control system for the installation of centrifugal cleaning of transformer oil. **Methodology.** Analytical methods of research, methods of the theory of electric machines and electric drives, and also methods of calculation of transfer functions of elements of the automated control systems and their dynamic characteristics are

used. **Results.** The structural scheme of the transformer-rectifier unit with the automated control system of the output voltage of the installation for cleaning transformer oil on the basis of the electric drive of the increased frequency is developed. Calculations of transfer functions of elements of the offered automated control system of the transformer-rectifier unit are executed and its dynamic characteristics are investigated. **Originality.** The scheme of the transformer-rectifier unit for installation of centrifugal cleaning of transformer oil with the electric drive of the increased frequency is developed and investigated. **Practical value.** The introduction of centrifugal transformer oil cleaning units with a high-frequency electric drive will increase the reliability, economy and weight of such units. The calculations allow us to draw conclusions about the compliance of the proposed scheme of the transformer-rectifier unit with an automated voltage control system for reliability and dynamic characteristics of the requirements for the secondary power supply of the centrifugal oil cleaning installation.

Keywords: power transformer, transformer oil, automated control system, transfer function, dynamic characteristics.

Tarasova Valentina¹, Ph.D., Assoc. Prof., Department of Electrical Systems, tel. +38066-828-47-31, val.vs.tarasova@gmail.com.

Hnatov Andrii², Head of department, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 066-7438-0887, kalifus76@gmail.com, orcid: 0000-0003-0932-8849

Arhun Shchasiana², Doct. of Science, Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 099-378-04-51, e-mail: shasyana@gmail.com, orcid: 0000-0001-6098-8661,

Nechaus Andrii², Ph.D, Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, тел. +38 067-777-02-24, a.nechaus@gmail.com,

Shymuk Dmytro¹, Ph.D., Assoc. Prof., Department of Electrical Systems, тел. +38 066-458-81-29, shimukds@gmail.com,

Bykova Olena², head lab., Vehicle Electronics Department, тел. +38 0665593053, ae.hnadu@gmail.com,

¹Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Force, Sumy 77/79 street, Kharkiv, 61023, Ukraine.

²Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.