

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТУРБОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ З КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКЦІЇ ЯКОРЯ

О Семенюк М.Б., 2008

Розроблено математичну модель турбогенераторної установки з компенсацією реакції якоря, досліджено процеси і характеристики системи в різних режимах роботи.

The mathematical model of synchronous generator power plant with compensation of armature reaction has been developed in this paper. This article presents research results of characteristics and processes by different operating modes.

Аналіз останніх досліджень. Відомими є системи збудження турбогенераторів з компенсацією реакції якоря [1]. Особливість таких систем полягає в наявності в них контуру компаундування. Струм збудження турбогенератора в цих системах формується за допомогою двох каналів: від збудника та за рахунок струму компаундування, який пропорційний струму статора турбогенератора.

Постановка проблеми. Враховуючи складність процесів в системах збудження з компаундуванням, зумовлену наявністю зворотних зв'язків у силовій схемі, актуальною є задача дослідження характеристик і процесів в системах генерування електроенергії синхронними машинами під час збудження синхронних машин з компенсацією реакції якоря.

Завданням дослідження є побудова математичної моделі турбогенераторної установки з компенсацією реакції якоря і застосування розробленої моделі для дослідження процесів у цій системі.

Математична модель турбогенераторної установки з компаундуванням. У схемі турбогенераторної установки з компаундуванням (рис. 1) обмотка збудження турбогенератора отримує живлення від двох некерованих випрямлячів В1 та В2. До того ж формування струму i_{B1} здійснюється за допомогою збудника ЗБ та системи керування турбогенератора, що складається з автоматичного регулятора збудження АРЗ, системи імпульсно-фазового керування СК, трансформатора напруги ТН та блока зворотних зв'язків БЗЗ. Струм i_{B2} (струм компаундування) формується за рахунок струму статора турбогенератора. Контур компаундування складається з трансформатора струму ТС та випрямляча В2.

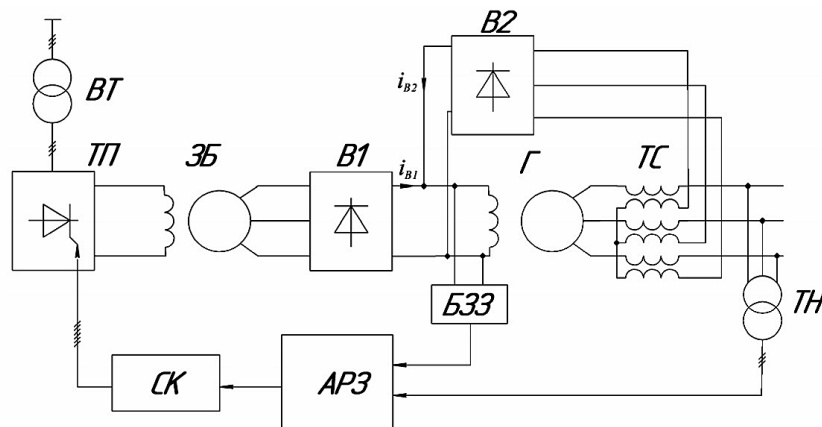


Рис. 1. Система збудження турбогенератора з компаундуванням

Математична модель турбогенераторної установки без врахування контуру компаундування, за розрахунковою схемою на рис. 2, згідно з теорією математичного моделювання електромашинно-вентильних систем [2] описується системою рівнянь

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m \Pi_j \dot{G}_{ej} \Pi_j^T \dot{V}_s + \sum_{j=1}^m \Pi_j \dot{C}_{ej} = 0, & (1) \\ \dot{V}_{ej} = \Pi_j^T \cdot \dot{V}_s, & (2) \\ p \dot{i}_e + \dot{G}_e \dot{V}_e + \dot{C}_e = 0, & (3) \end{cases}$$

де m – кількість структурних елементів, які входять в електромеханічну систему, $\dot{V}_s = (V_{s1}, \dots, V_{sk})_t$ – вектор потенціалів незалежних вузлів системи, $\Pi_j (j=1, \dots, m)$ – матриця, під'єднання j -го структурного елемента; $\dot{i}_e = (i_1, \dots, i_n)_t$, $\dot{V}_e = (V_1, \dots, V_n)_t$ – вектори струмів зовнішніх віток і потенціалів зовнішніх вузлів багатополосника; \dot{G}_e , \dot{C}_e – відповідно матриці $(n \times n)$ і вектор розмірності n , які визначаються параметрами структурного елемента.

До складу математичної моделі входять математичні моделі таких типових структурних елементів: мережі (МЕР), випрямного трансформатора (ВТ), тиристорного перетворювача (ТП), збудника (ЗБ), синхронного турбогенератора (Г), лінії електропередач (ЛЕП).

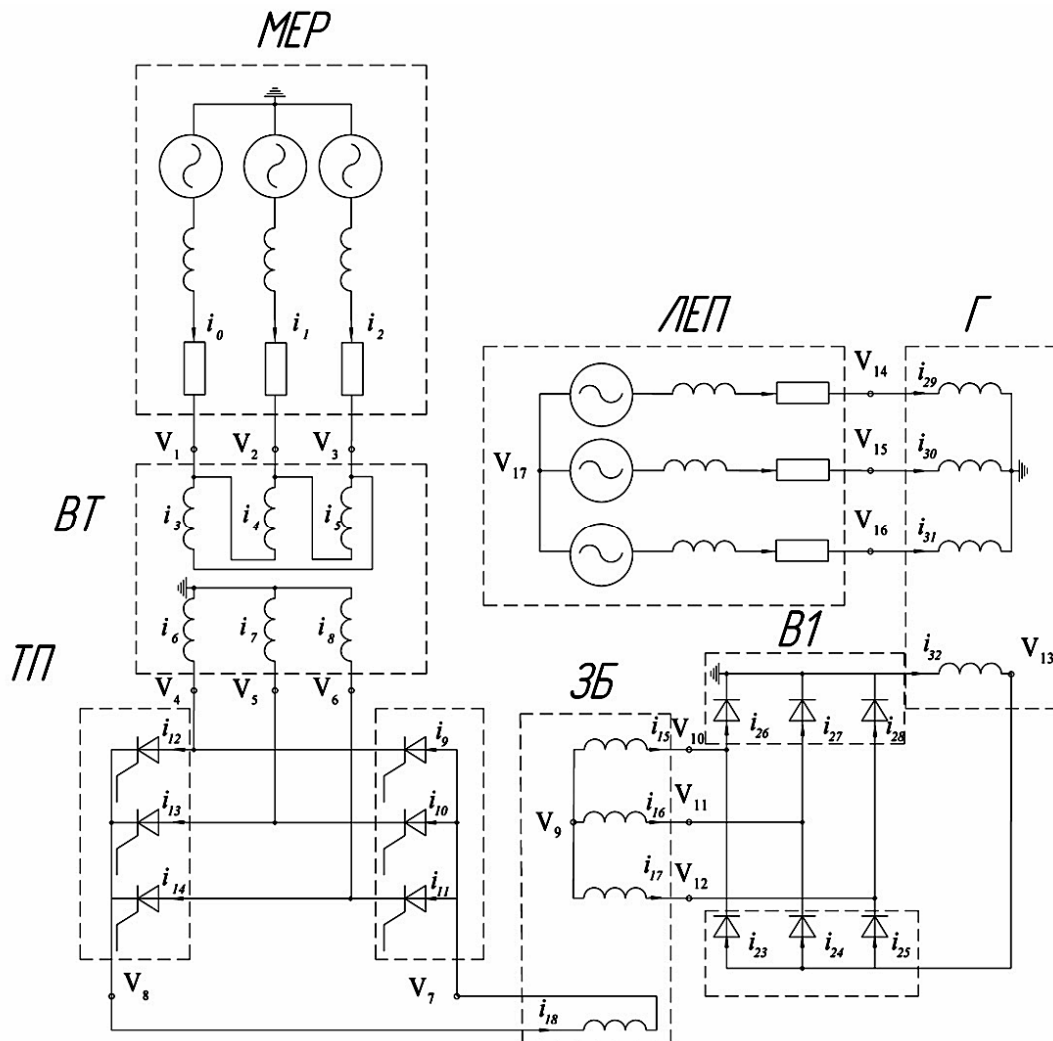


Рис. 2. Розрахункова схема турбогенераторної установки без врахування компаундування

Автоматичний регулятор збудження АРЗ турбогенераторної установки, структурна схема якого показана на рис. 3, містить три канали регулювання:

- за відхиленням напруги турбогенератора ΔU_f ;
- за похідною струму збудження I_f ;
- за відхиленням напруги збудження ΔU_f .

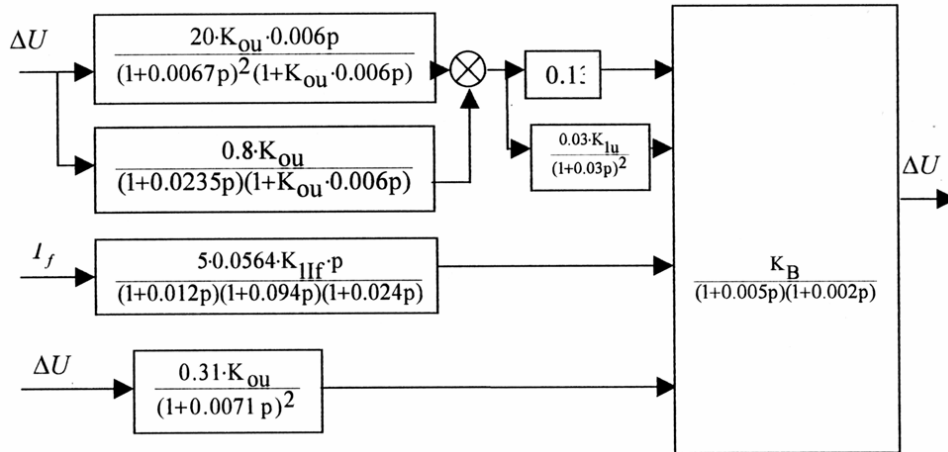


Рис. 3. Структурна схема автоматичного регулятора збудження

Для врахування в математичній моделі струму компаундування i_{B2} , розглянемо фізичні процеси, що відбуваються в контурі компаундування. Випрямляч В2 отримує живлення від трифазного трансформатора струму, первинні обмотки якого під'єднані до турбогенератора. Струм компаундування i_{B2} (рис. 4) визначається як функція струмів статора турбогенератора згідно з формулою (4), яка запропонована професором О. Г. Плахтиною

$$i_{B2} = \frac{g_a \cdot i_a}{k_i} + \frac{g_b \cdot i_b}{k_i} + \frac{g_c \cdot i_c}{k_i}, \quad (4)$$

де g_a, g_b, g_c – провідності фази А, В, С випрямляча В2, k_i – коефіцієнт трансформації трифазного трансформатора струму.

Провідності g_a, g_b, g_c визначають за таким алгоритмом. Якщо миттєве значення струму $i_a(t)$ більше від нуля, тоді провідність g_a дорівнює одиниці, в іншому випадку провідність g_a дорівнює нулю (рис.4). Аналогічно визначають провідності g_b, g_c (рис. 4).

З рівняння (3) для синхронного генератора запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} g_{11} \cdot V_1 + g_{12} \cdot V_2 + g_{13} \cdot V_3 + g_{14} \cdot V_4 + g_{15} \cdot V_5 + g_{16} \cdot V_6 + g_{17} \cdot V_7 + g_{18} \cdot V_8 + p i_a + C_1 = 0, \\ g_{21} \cdot V_1 + g_{22} \cdot V_2 + g_{23} \cdot V_3 + g_{24} \cdot V_4 + g_{25} \cdot V_5 + g_{26} \cdot V_6 + g_{27} \cdot V_7 + g_{28} \cdot V_8 + p i_b + C_2 = 0, \\ g_{31} \cdot V_1 + g_{32} \cdot V_2 + g_{33} \cdot V_3 + g_{34} \cdot V_4 + g_{35} \cdot V_5 + g_{36} \cdot V_6 + g_{37} \cdot V_7 + g_{38} \cdot V_8 + p i_c + C_3 = 0, \end{cases} \quad (5)$$

де g_{ik} – коефіцієнти матриці \mathbf{G}_e в рівнянні (3) для синхронного генератора, \mathbf{V}_e – потенціали зовнішніх полюсів синхронного генератора як восьмиполіусника.

У математичній моделі потенціали турбогенератора $V_1 = V_2 = V_3 = 0, V_4 = V_{s13}, V_5 = V_{s14}, V_6 = V_{s15}, V_7 = V_{s16}, V_8 = 0$, тому система рівнянь (5) набуває вигляду

$$\begin{cases} g_{14} \cdot V_{s13} + g_{15} \cdot V_{s14} + g_{16} \cdot V_{s15} + g_{17} \cdot V_{s16} + p i_a + C_1 = 0, \\ g_{24} \cdot V_{s13} + g_{25} \cdot V_{s14} + g_{26} \cdot V_{s15} + g_{27} \cdot V_{s16} + p i_b + C_2 = 0, \\ g_{34} \cdot V_{s13} + g_{35} \cdot V_{s14} + g_{36} \cdot V_{s15} + g_{37} \cdot V_{s16} + p i_c + C_3 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

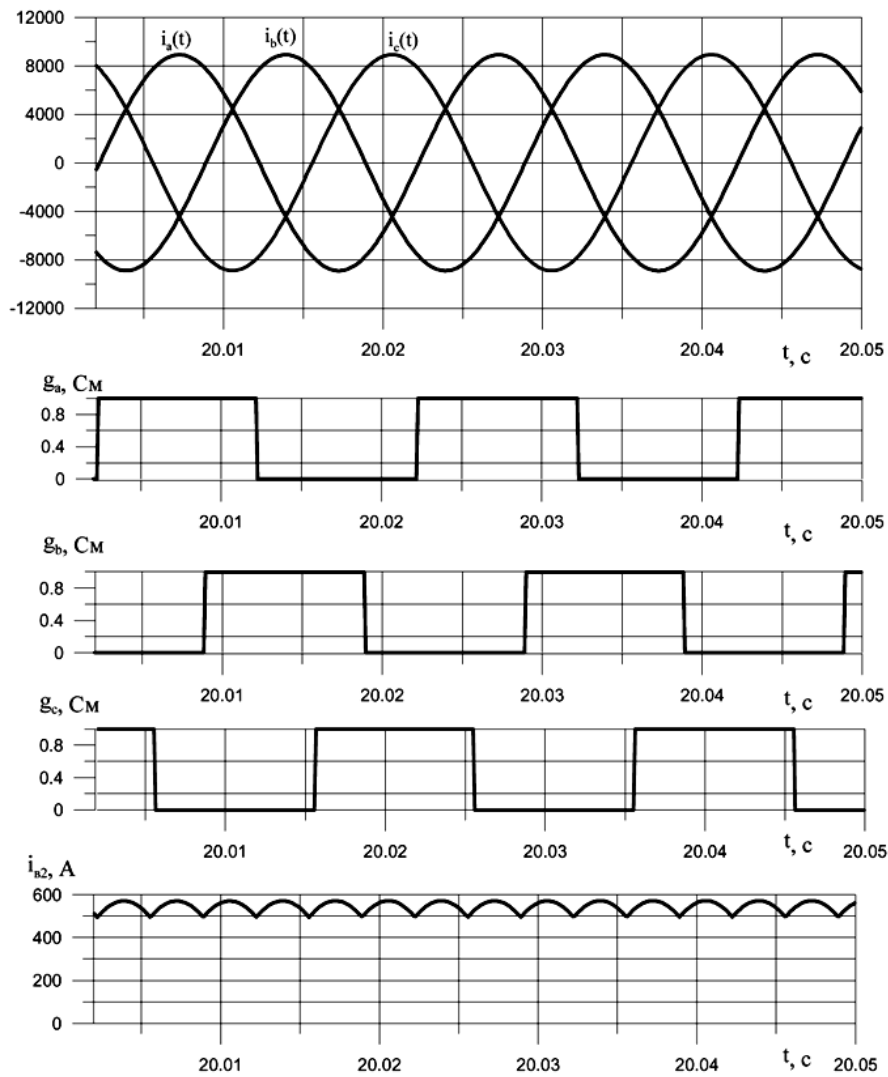


Рис. 4. Струми статора турбогенератора, провідності вентилів випрямляча В2 та струм компаундування

Помноживши систему рівнянь (6) на $\frac{g_a}{k_i}$ та підсумувавши їх, отримаємо

$$\frac{1}{k_i}(g_a g_{14} + g_b g_{24} + g_c g_{34})V_{s13} + \frac{1}{k_i}(g_a g_{15} + g_b g_{25} + g_c g_{35})V_{s14} + \frac{1}{k_i}(g_a g_{16} + g_b g_{26} + g_c g_{36})V_{s15} + \frac{1}{k_i}(g_a g_{17} + g_b g_{27} + g_c g_{37})V_{s16} + p_{iB2} + \frac{1}{k_i}(g_a C_1 + g_b C_2 + g_c C_3) = 0. \quad (7)$$

Сформувавши матрицю $\sum_{j=1}^m \prod_j G_{ej} \prod_j T_j$ та вектор $\sum_{j=1}^m \prod_j C_{ej} \mathbf{r}$ рівняння (1) з врахуванням коефіцієнтів при незалежних потенціалах системи V_{s13} , V_{s14} , V_{s15} , V_{s16} та коефіцієнта $\frac{1}{k_i}(g_a C_1 + g_b C_2 + g_c C_3)$ рівняння (7), отримаємо математичну модель турбогенераторної установки з компенсацією реакції якоря.

Результати дослідження. Параметри генераторної установки з компаундування, що входять в математичну модель, є такими. Для збудника ЗБ: потужність 214 кВА, робоча індуктивність по осі d – $L_d = 0.0001446$ Гн, індуктивність реакції якоря по осі d – $L_{ad} = 0.0001213$ Гн, індуктивність

розсіяння по обмотки збудження (приведена до статора) – $L_{\sigma f} = 0.0000746$ Гн, індуктивність нульової послідовності – $L_0 = 0.0000044$ Гн, коефіцієнт приведення струму збудження до струму статора $k_{if} = 0.0083$, активні опори обмоток статора та збудження – $r_s = 0.01$ Ом, $r_f = 2.73$ Ом, момент інерції ротора $J = 1.0625$ тм², номінальний струм збудження $I_{fn} = 15$ А, номінальна частота на виході збудника 500 Гц. Для турбогенератора Г: напруга на виході турбогенератора $U_r = 10.5$ кВ, потужність 100 МВт, номінальний струм статора $I_r = 6875$ А, номінальний струм збудження $I_f = 1715$ А, $L_d = 0.00536$ Гн, $L_{ad} = 0.0048$ Гн, $L_{\sigma f} = 0.0007578$ Гн, індуктивність демпферної обмотки за осями d і q – $L_{\sigma D} = 0.0005389$ Гн, $L_{\sigma Q} = 0.005389$ Гн, $k_{if} = 0.1$, $L_0 = 0.00000951$ Гн, $r_s = 0.008$ Ом, $r_f = 0.12$ Ом, $J = 10.5$ тн². Для випрямного трансформатора ВТ: $S_n = 29.1$ кВА, $U_{1n} = 380$ В, $U_{2n} = 220$ В, $I_{нх} = 20$ А, $U_{кз} = 41$ В, $\Delta P_{кз} = 300$ Вт. Параметри АРЗ: $k_B = 120$, $k_{ou} = 20$, $k_{lu} = 0.5$, $k_{lIf} = 1.0$, $k_{uf} = 0.3$. Параметри ЛЕП (10 кВ): індуктивність лінії $L_{л} = 0.0005$ Гн, активний опір $R_{л} = 0.0001$ Ом.

Режим початкового збудження. Результати режиму програмного початкового збудження турбогенератора показані на рис. 5–6. Наростання напруги турбогенератора відбувається лінійно (рис. 5, а) до номінального значення. Оскільки турбогенератор запускається в режимі неробочого ходу, дія контуру компаундування відсутня, тобто струм збудження турбогенератора (рис. 6, б) дорівнює струму i_{B1} випрямляча В1 (рис 5, б).

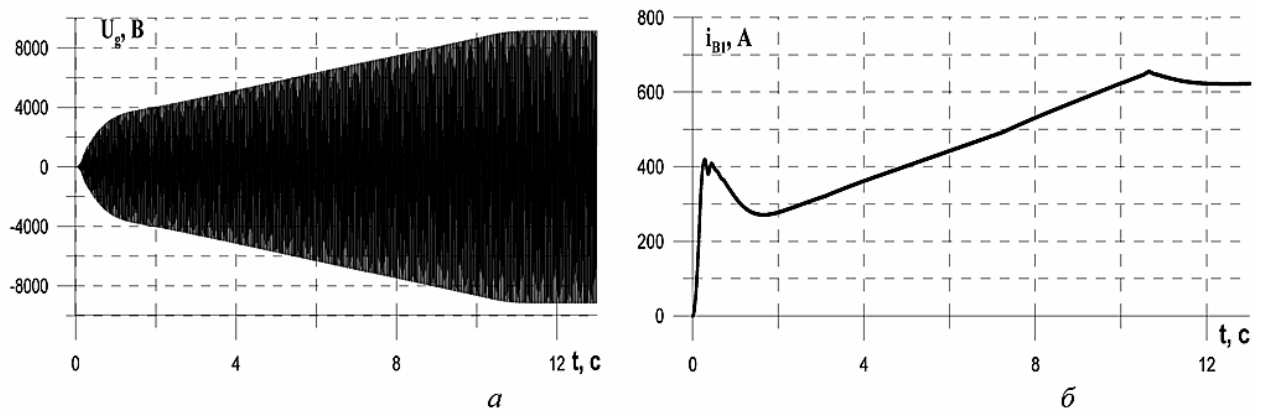


Рис. 5. Фазна напруга (а) турбогенератора та струм (б) випрямляча В1

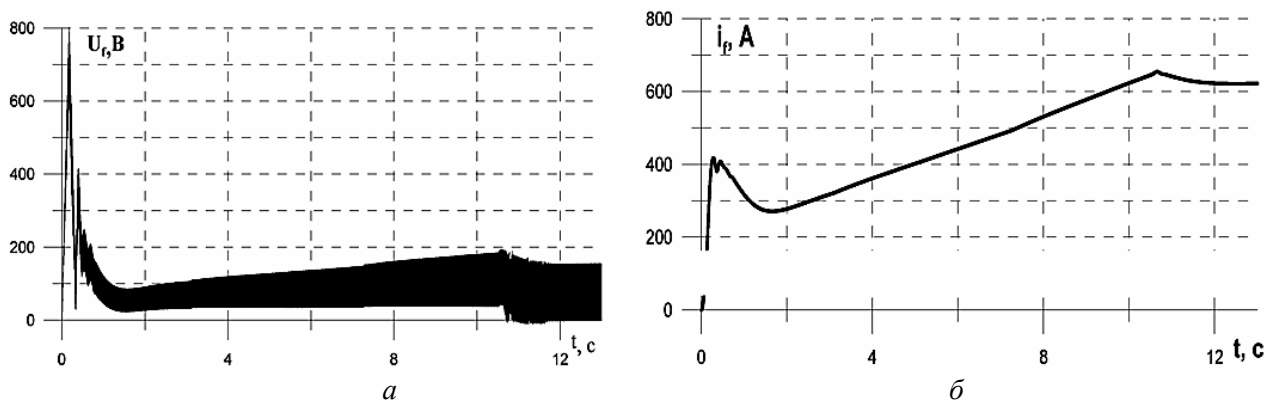


Рис. 6. Напруга (а) та струм збудження (б) турбогенератора

Завантаження турбогенератора. На рис. 7–8 показані результати режиму завантаження турбогенератора. У разі ввімкнення турбогенератора в мережу, у цьому випадку лінію електропередач ЛЕП, спостерігаються коливання напруги турбогенератора (рис. 7, а), які пов'язані з перехідним процесом. Перехідний процес струму статора турбогенератора показаний на рис. 7, б.

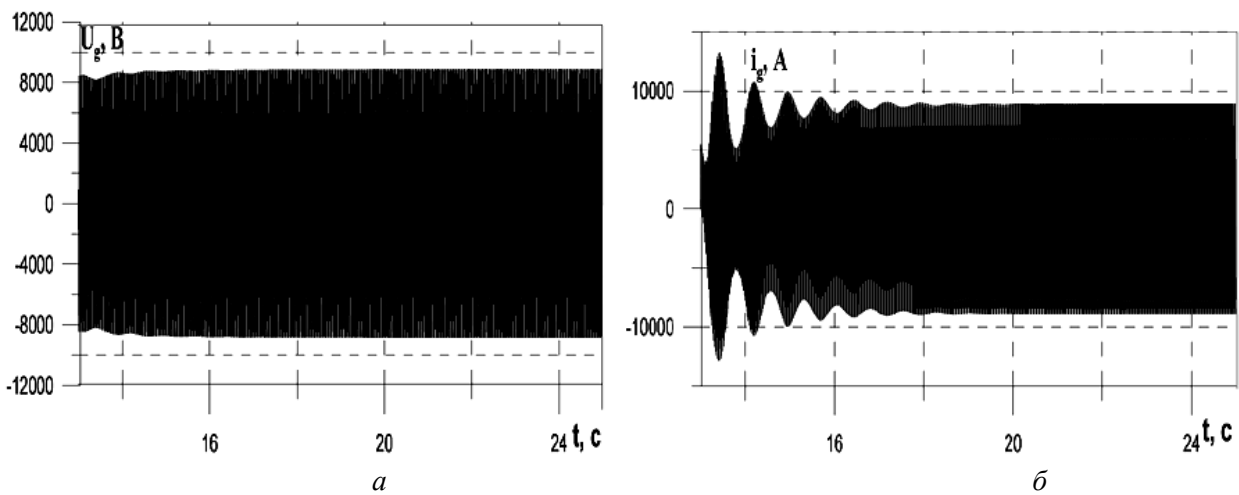


Рис. 7. Фазна напруга (а) та струм (б) турбогенератора

Струм збудження турбогенератора (рис. 8, б) дорівнює сумі струму i_{B1} (рис. 9, а) та струму компаундування i_{B2} (рис. 9, б). Коливання струму збудження турбогенератора під час перехідного режиму пов'язані з коливаннями струму навантаження турбогенератора.

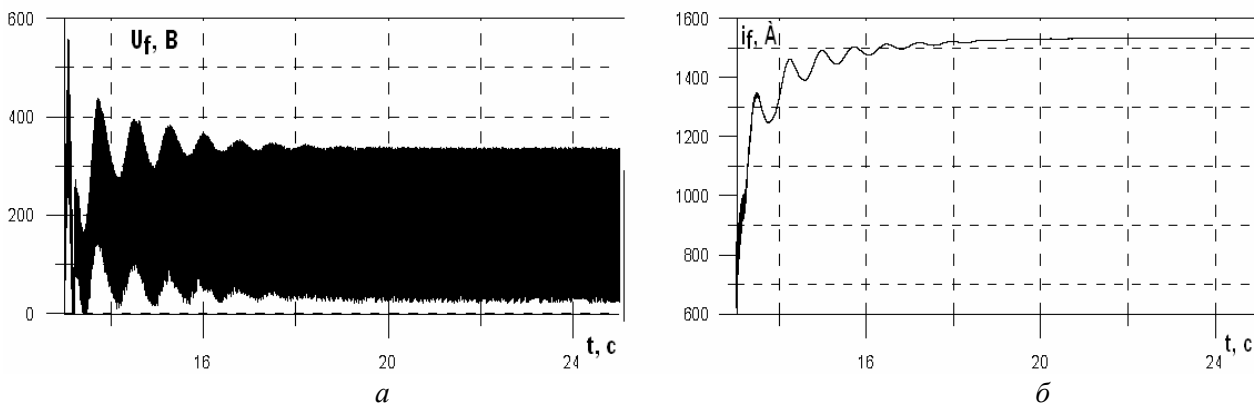


Рис. 8. Напруга (а) та струм (б) збудження турбогенератора

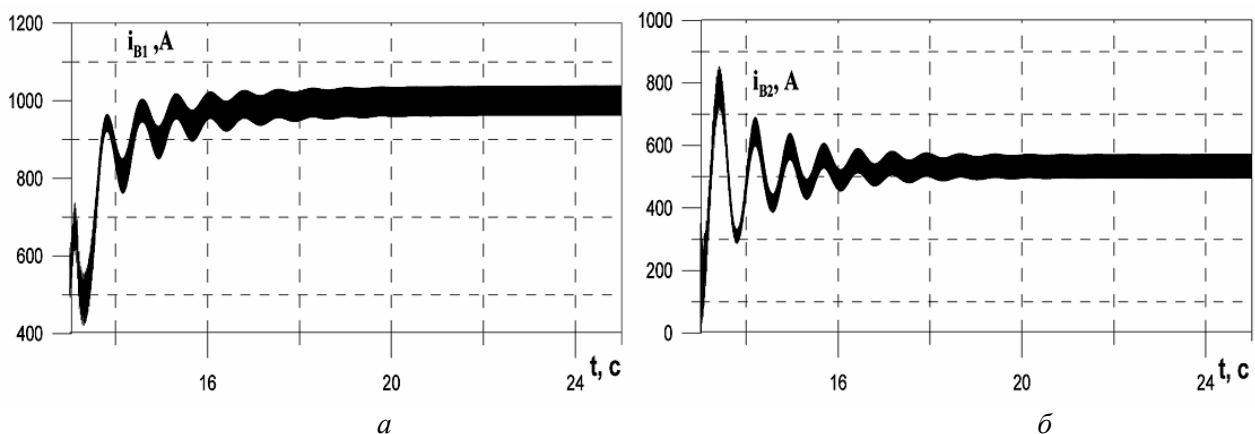


Рис. 9. Струм випрямляча В1 (а) та струм випрямляча В2 (б)

На рис. 10–11 показані струм випрямляча В1 (рис. 10, а), струм випрямляча В2 (рис. 10, б) і струм збудження (рис. 11) в усталеному режимі.

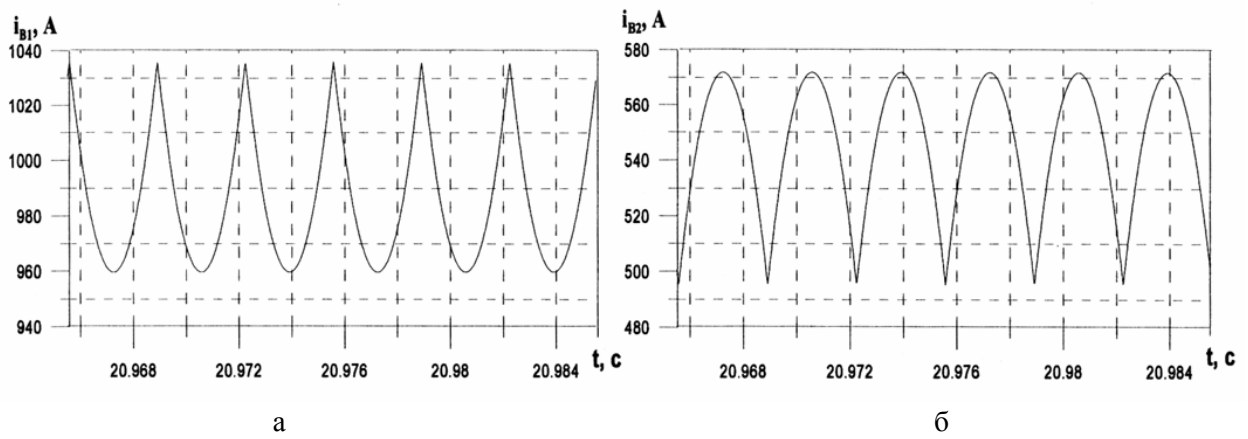


Рис. 10. Струм випрямляча В1 (а), струм випрямляча В2 (б) в усталеному режимі

Як зрозуміло з рис. 10 пульсації струму випрямляча В1 становлять 7,3 %, струму випрямляча В2 – 13,6 %. Ці пульсації взаємокомпенсуються і пульсації струму збудження турбогенератора є незначними (0,013 %).

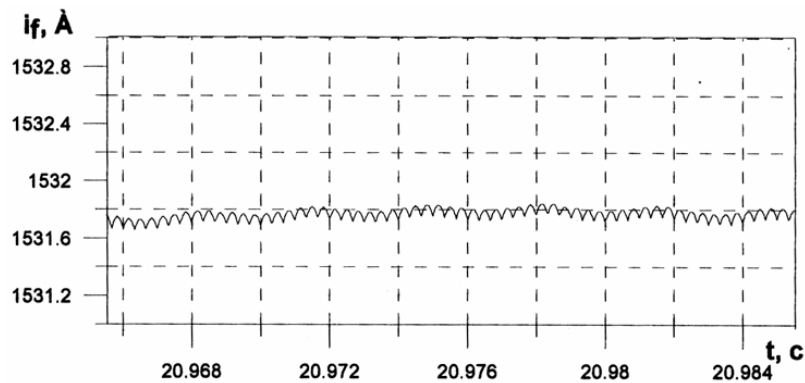


Рис. 11. Струм збудження турбогенератора в усталеному режимі

Висновки. 1. Введення до безщіткової системи збудження швидкодіючого контуру компаундування дає змогу покращити динамічні характеристики системи.

2. Контур компаундування дозволяє розвантажити основний випрямляч В1, збудник ЗБ і покращити гармонічний спектр струму збудження турбогенератора.

1. Наумов В.Ф. Гибридная система самовозбуждения для мощных генераторов // Техническая электродинамика. Ч. 5–6. – 1994. – С. 59–65. 2. Плахтына О.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем – Львов: Вища шк., 1986. – 161 с.