

**АНАЛІЗ ТРИВАЛОСТІ ОПТИМАЛЬНОЇ ЗА НАНОШВИДКОДІЄЮ
РЕЖИМІВ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ****DURATION ANALYSIS OF OPTIMUM ON OPERATION NANOSPEED MODELS OF TRANSIENT PROCESSES OF TELECOMMUNICATION NETWORKS SYNCHRONIZATION**

Анотація. В статті розроблено метод тривалості оптимальної за наношвидкодією режимів веденого тактового генератора. Метод зводиться до значень траєкторій руху в тривимірному просторі і точок координат перетину управляючих збуджень. Існує проблема підвищення якості оптимальної за наношвидкодією режимів перехідних процесів синхронізації телекомунікаційних мереж.

Summary. Method of duration on operation nanospeed slave clocks is worked out and given in the article. The method conceives values of movement trajectories in 3-d phase space and coordinates of crossing of controlling excitations. The quality improvement of an optimum on operation nanospeed modes of transient processes of synchronization in telecom networks seems to be a problem.

Математична теорія оптимальних процесів детально відома, наприклад, в роботах [1], але фактори техніки, які започаткували створення оптимальних за наношвидкодією управлінь, не були виділені в загальній проблемі [2, 3].

Так створена європейська ієрархічна чотирирівнева архітектура міжвузлової синхронізації згідно з Рекомендаціями і стандартами ITU-T і ETSI [4, 5], яка включає одне або декілька первинних джерел синхронізації (ПДС): ведені, магістральні пристрої синхронізації; місцеві і термінальні генератори. З'єднання ПДС, які мають найвищу стабільність частоти тактових синхросигналів, відіграють роль ведучих тактових генераторів (ВТГ), виконуються деревоподібним засобом, що викликає необхідність ієрархічної побудови мережі синхронізації. Ведені пристрої синхронізації (ВПС) або вторинні тактові генератори, які мають меншу стабільність частоти ТСС, ніж ПДС, відіграють роль ведених тактових генераторів (ВдТГ). Управління розподілом синхроінформації здійснюється за принципом "зверху вниз" від ПДС до ВдТГ нижчих рангів.

Особливістю математичної моделі об'єкта управління системи фазового автопідстроювання частоти є: 1) управляюче збудження періодичне $F[\varphi(t)]$ з періодичною по фазовій координаті похибкою $\varphi(t)$; 2) система об'єкта управління виконує більше двох петель в кільці, тому що при підвищеній динаміці флуктуації фази вищі досліджуваної спроможності. Проте фільтр петлі СФАПЧ з двома полюсами в точці $p = 0$, згідно з передатною функцією в статичному режимі, можна відстежити частоту вхідного сигналу ВТГ при нульовій початковій похибці фази; 3) оптимальний за наношвидкодією режим має як теоретичне, так і практичне значення. Таке дослідження в публікаціях не зазначене і має велике значення.

Метою даної статті є аналіз тривалості оптимальних за наношвидкодією режимів перехідних процесів синхронізації телекомунікаційних мереж.

Доповідь з даної теми опубліковано в роботі [6].

1. Математична модель поведінки об'єкта управління синхронізації в трьохвимірному фазовому просторі. За функціями (рис. 1), які виконуються обладнанням мереж синхронізації, є ПДС або ВТГ ВдТГ. Перший генератор є використання еталонного (опорного) синхросигналу, а функцією другого є приймання і вибір одного із тактових генераторів від зовнішніх джерел, наприклад, від ВТГ; його фільтрація і розподіл між пристроями синхронізації об'єктів одного вузла синхронізації. В випадку відсутності еталонного сигналу на його вході він може працювати з запам'ятованим значенням еталонного тактового синхросигналу, або підключати внутрішнє джерело синхронізації.

ВТГ генерує еталонний ТСС окремо, незалежно (автономно) або за допомогою приймання і фільтрації від інших джерел через розповсюдження. Наприклад, по спеціальних радіо, радіометереологічних каналах для звірення частот, супутниковим каналам – сигнал від глобальної системи навігації і визначення місцезнаходження GPS/ГЛОНАСС; кінцевих оптичних групових трактах технології СЦІ STM-N; ТфМЗК та інших.

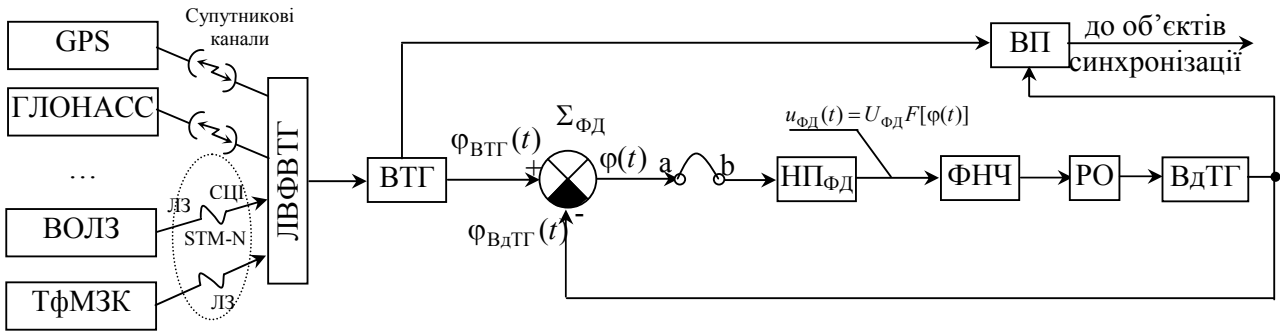


Рисунок 1 – Функціональна схема ведених пристроїв синхронізації телекомунікаційних мереж з фазовим автопідстроюванням частоти

Логічний визначник фази ВТГ, згідно з Рекомендаціями і стандартами ІТУ-Т і ЕТСІ [4, 5], полягає в прийманні тактових синхросигналів від еталонних генераторів зовнішніх джерел; вибору одного кращого за якістю і його фільтрації з двох зовнішніх еталонних сигналів; розподілу синхроінформації по ВдТГ по об'єктах вузла синхронізації.

Розглянемо фазову похибку $\varphi(t)$ системи автопідстроювання частоти з урахуванням фаз ВТГ $\varphi_{ВТГ}(t)$ і ВдТГ $\varphi_{ВдТГ}(t)$:

$$\varphi(t) = \varphi_{ВТГ}(t) - \varphi_{ВдТГ}(t). \quad (1)$$

Похибка $\varphi(t)$ перетворюється фазовим детектором (ФД) в напругу $u_{ФД}(\varphi(t))$. У загальному випадку це перетворення описується нелінійним рівнянням типу НПФД. Миттєва вихідна напруга ФД визначається його експлуатаційною характеристикою, яка має періодичний характер у функції похибки системи:

$$u_{ФД}[\varphi(t)] = U_{ФД} \cdot F[\varphi(t)], \quad (2)$$

де $F[\varphi(t)]$ – нормативна характеристика ФД, тобто відношення по модулю миттєвої напруги до максимальної напруги $U_{ФД}$.

Фільтр нижніх частот (ФНЧ) фільтрує фазову похибку, подає на регулюючий орган (РО), який і спрямовує $\varphi_{ВдТГ}(t)$ до значення 0.

Вирішальний пристрій (ВП) вузла синхронізації розповсюджує синхроінформацію по об'єктах синхронізації.

Структурна схема об'єкта управління синхронізації телекомунікаційних мереж із гіпотетичним і реальним інтегрованими колами ФНЧ показана на рис. 2.

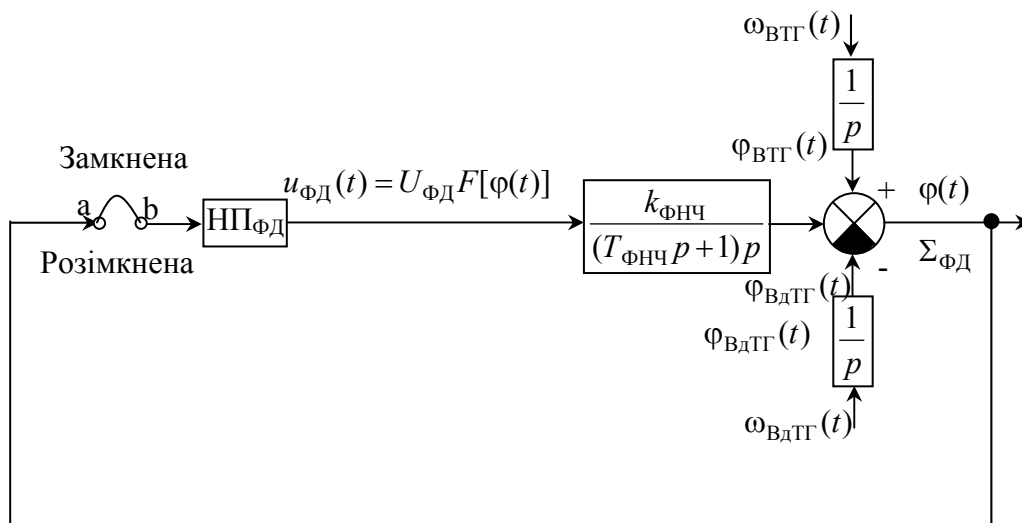


Рисунок 2 – Структурна схема об'єкта управління синхронізації телекомунікаційних мереж із гіпотетичним і реальним інтегрованими колами ФНЧ

Відомо, що передатна функція поведінки ФНЧ має вигляд:

$$K_{\text{ФНЧ}} = \frac{k_{\text{ФНЧ}}}{(T_{\text{ФНЧ}}p + 1) \cdot p}, \quad (3)$$

де $k_{\text{ФНЧ}}$ – коефіцієнт підсилення ФНЧ; $T_{\text{ФНЧ}}$ – постійна часу ФНЧ; p – оператор Лапласа.

Порівнюючи математичну модель об'єкта управління системи фазового автопідстроювання частоти у вигляді неоднорідного диференційного рівняння, з моделлю розроблено в книзі [3], із підстановленням формул (2) і (3) при $\Omega_n = \text{const}$, отримуємо рівняння:

$$\begin{cases} \frac{d^3\varphi(t)}{dt^3} + a_2 \cdot \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} = bF[\varphi(t)]; \\ F[\varphi(t)] = F[\varphi(t) + T_\varphi], T_\varphi = \text{const}, (T_\varphi = 2\pi), \end{cases} \quad (4)$$

де $a_2 = \frac{1}{T_{\text{ФНЧ}}}$; $b = -\frac{k \cdot k_{\text{ФНЧ}}}{T_{\text{ФНЧ}}} \cdot U_{\text{ФД}}$; $U_{\text{ФД}}$ і T_φ – амплітуда і період управляючого збудження в статичному режимі.

Багаточленне еквівалентне перетворення і спрощення математичних моделей типу (4) ведених тактових генераторів приводить до коагульованих нормальних жорданових форм:

$$\begin{cases} \frac{dz_1(t)}{dt} = z_2(t) + u(t); \\ \frac{dz_2(t)}{dt} = -u(t); \\ \frac{dz_3(t)}{dt} = -p_3 z_3(t) + u(t), \end{cases} \quad (5)$$

де $z_i(t)$ ($\forall i = \overline{1, 3}$) – система нових змінних; p_3 – дійсний корінь характеристичного рівняння (4); $u(t)$ – управляюче збудження на виході ФД.

2. Аналіз тривалості оптимальних за наношвидкодією режимів перехідних процесів синхронізації. Методом тривалості оптимальних за наношвидкодією режимів перехідних процесів об'єкта управління тактовими генераторами можна знайти тривалості значень інтервалів оптимальних траєкторій руху в тривимірному фазовому просторі і точок координат перетину управляючих збуджень.

Рішення системи диференційних рівнянь (5) в часі дорівнює:

$$\begin{cases} z_1(t) = z_{10} + (z_{20} - U)t + \frac{1}{2}Ut^2; \\ z_2(t) = z_{20} - Ut; \\ z_3(t) = (z_{30} - U)\exp(-p_3 t) + Ut; \end{cases} \quad (6)$$

де $u_{\text{ОПТ}}(t) = U_{\text{ФД}} \text{sign} \sin \varphi(t) + A$; $A = U$; $z_i(t) = z_{i0}$, $\forall i = \overline{1, 3}$ – координати точок руху в початковий момент; U дорівнює U^+ або U^- .

Із системи рішень (6) можна знайти тривалості оптимальних за наношвидкодією режимів перехідних процесів об'єкта управління.

Для першого інтервалу оптимального руху траєкторій в тривимірному фазовому просторі за другою системою рішень (6) у варіанті $[U^+]$ отримуємо:

$$T'_{\text{ОПТ}} = \left| \frac{z''_{3\text{К}} - z_{20}}{U^+} \right|, \quad (7)$$

або у варіанті $[U^-]$

$$T''_{\text{ОПТ}} = \left| \frac{z''_{3\text{К}} - z_{20}}{U^-} \right|, \quad (8)$$

де $z''_{3\text{К}}$, $\forall i = \overline{1, 3}$ – точки координат замкненої кривої граничного циклу.

Загальна тривалість оптимального руху траєкторій (7) і (8) дорівнює $T'_{\text{ОПТ}}$ або $T''_{\text{ОПТ}}$.

Для двох інтервалів за другою системою рішень (6) за варіантом $[U^-; U^+]$ отримаємо:

I інтервал оптимального за наношвидкодією руху:

$$T'_{1\text{ОПТ}} = \left| \frac{\bar{z}_{21} - z''_{3\text{К}}}{U^-} \right|; \quad (9)$$

II інтервал оптимального за наношвидкодією руху:

$$T''_{2\text{ОПТ}} = \left| \frac{z_{20} - \bar{z}_{21}}{U^+} \right|, \quad (10)$$

де $z_{21}(t) = \bar{z}_{21}$ - постійна точка перетину управляючих збуджень між першим і другим інтервалами координати $z_{21}(t)$.

Загальна тривалість оптимального за наношвидкодією руху траєкторій дорівнює:

$$T'_{\text{ОПТ}2} = T'_{1\text{ОПТ}} + T''_{2\text{ОПТ}}. \quad (11)$$

Для двох інтервалів за другою системою рішень (6) за варіантом $[U^+; U^-]$ отримаємо:

I інтервал оптимального за наношвидкодією руху:

$$T''_{1\text{ОПТ}} = \left| \frac{\bar{z}_{21} - z''_{3\text{К}}}{U^+} \right|; \quad (12)$$

II інтервал оптимального за наношвидкодією руху:

$$T''_{2\text{ОПТ}} = \left| \frac{z_{20} - \bar{z}_{21}}{U^-} \right|. \quad (13)$$

Загальну тривалість оптимального за наношвидкодією руху траєкторій маємо:

$$T''_{\text{ОПТ}2} = T''_{1\text{ОПТ}} + T''_{2\text{ОПТ}}. \quad (14)$$

Для трьох інтервалів за другою системою (6) для варіанта $[U^+; U^-; U^+]$ отримаємо:

I інтервал оптимального за наношвидкодією руху:

$$T'_{1\text{ОПТ}} = \left| \frac{\bar{z}_{21} - z''_{3\text{К}}}{U^+} \right|; \quad (15)$$

II інтервал оптимального за наношвидкодією руху:

$$T'_{2\text{ОПТ}} = \left| \frac{\bar{z}_{22} - \bar{z}_{21}}{U^-} \right|; \quad (16)$$

III інтервал оптимального за наношвидкодією руху:

$$T'_{3\text{ОПТ}} = \left| \frac{\bar{z}_{22} - z_{20}}{U^+} \right|, \quad (17)$$

де $z_{22}(t) = \bar{z}_{22}$ - постійна точка перетину управляючих збуджень між другим і третім інтервалами координати $z_{22}(t)$.

Загальну тривалість оптимального руху маємо:

$$T'_{\text{ОПТ}3} = T'_{1\text{ОПТ}} + T'_{2\text{ОПТ}} + T'_{3\text{ОПТ}}. \quad (18)$$

Для трьох інтервалів за другою системою (6) для варіанта $[U^-; U^+; U^-]$ отримаємо:

I інтервал оптимального за наношвидкодією руху:

$$T''_{1\text{ОПТ}} = \left| \frac{\bar{z}_{21} - z''_{3\text{К}}}{U^-} \right|; \quad (19)$$

II інтервал оптимального за наношвидкодією руху:

$$T''_{2\text{ОПТ}} = \left| \frac{\bar{z}_{22} - \bar{z}_{21}}{U^+} \right|; \quad (20)$$

III інтервал оптимального за наношвидкодією руху:

$$T_{3\text{ОПТ}}'' = \left| \frac{\bar{z}_{22} - z_{20}}{U^-} \right|. \quad (21)$$

Загальну тривалість оптимального руху маємо:

$$T_{\text{ОПТЗ}}'' = T_{1\text{ОПТ}}'' + T_{2\text{ОПТ}}'' + T_{3\text{ОПТ}}'' \quad (22)$$

3. Визначення точок координат перетину управляючих збуджень. Заключний інтервал тривалості оптимальних за наношвидкодією синхронізації на точки ЗКЦ при статичному режимі із координатами $[z_{3K}^i], \forall i = \overline{1, 3}$ відомо з робочими характеристиками $(\varphi_{\text{СТ}}, \omega_{\text{СТ}}, T_{\varphi})$ і визначимо рішення точок координати початкового положення в динамічному режимі із координатами $[z_{i0}], \forall i = \overline{1, 3}$ (рис. 3, а), тоді формули (6) і (7) отримують інтервали оптимального руху траєкторій в тривимірному фазовому просторі.

Інтервали тривалості оптимальних за наношвидкодією режимів управляючих збуджень при рівності в точці координат перетину при $T_{1\text{ОПТ}}'$ або $T_{2\text{ОПТ}}'$ за формулами (9), (10) і формулою (12), (13) при $T_{1\text{ОПТ}}''$ або $T_{2\text{ОПТ}}''$ в точці координат перетину $\bar{z}_1 = \{\bar{z}_{11}, \bar{z}_{21}, \bar{z}_{31}\}$ із координатою \bar{z}_{21} , що означає рівність (рис. 3, б):

– при першому варіанті $[U^+; U^-]$:

$$\bar{z}_{21}^- = \frac{U^- z_{20} + U^+ z_{3K}''}{U^+ + U^-}; \quad (23)$$

– при другому варіанті $[U^-; U^+]$:

$$\bar{z}_{21}^- = \frac{U^+ z_{20} + U^- z_{3K}''}{U^- + U^+}. \quad (24)$$

Інтервали тривалості оптимальних за наношвидкодією режимів управляючих збуджень при рівності в точці координат перетину $\bar{z}_{in} = \{\bar{z}_{im}\}, \forall m = \overline{1, 2}, n = \overline{1, 3}$, при $T_{i\text{ОПТ}}, \forall i = \overline{1, 3}$ за формулами (19) ... (21) з координатами \bar{z}_{21} і \bar{z}_{22} визначається рівняннями при варіанті $[U^+; U^-; U^+]$ (рис. 1, в):

в точці перетину між першим і другим інтервалами руху:

$$\begin{cases} \bar{z}'_{21} = z''_{3K} + U^+ \cdot T_{1\text{ОПТ}} \Big|_{t_{mn}}; \\ \bar{z}'_{22} = z''_{21} + U^- \cdot T_{2\text{ОПТ}} \Big|_{t_{mn}}, \end{cases} \quad (25)$$

або

$$\begin{cases} \bar{z}'_{22} = z''_{21} + U^- \cdot T_{1\text{ОПТ}} \Big|_{t_{mn}}; \\ \bar{z}'_{20} = z''_{22} + U^+ \cdot T_{2\text{ОПТ}} \Big|_{t_{mn}}, \end{cases} \quad (26)$$

де t_{mn}' і t_{mn}'' - інтервал оптимального за наношвидкодією режимів управляючих збуджень в кінці $T_{1\text{ОПТ}}$ і на початку $T_{2\text{ОПТ}}$. Звичайно, що

$$T_{1\text{ОПТ}} \Big|_{t_{mn}'} = T_{2\text{ОПТ}} \Big|_{t_{mn}''}, \quad (27)$$

тоді із рівняння системи (25) отримаємо:

$$\bar{z}'_{22} = \bar{z}'_{21} \left(1 + \frac{U^-}{U^+} \right) - z''_{3K} \cdot \frac{U^-}{U^+}; \quad (28)$$

а із рівняння системи (26) отримаємо:

$$\bar{z}'_{22} = \frac{U^-}{U^+ + U^-} \cdot z''_{20} + \frac{U^+}{U^+ + U^-} \cdot \bar{z}'_{21}. \quad (29)$$

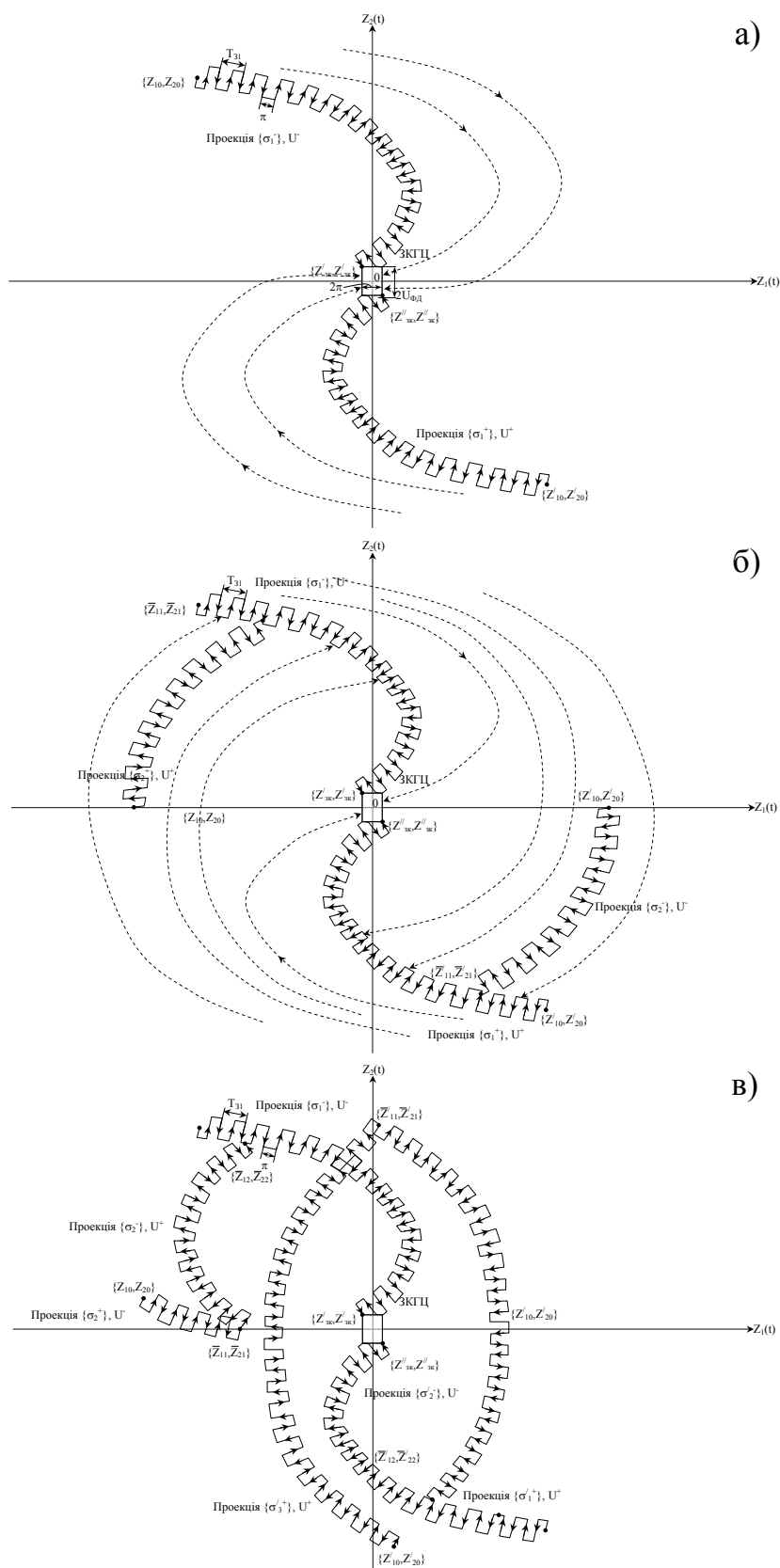


Рисунок 3 – Демонстрація застосування способу в точках координат перетину управляючих збуджень в оптимальних за наносвидкодією синхронізації телекомунікаційних мереж: проекція примусових траєкторій на площині $Z_1(t)$, $Z_2(t)$ із одним (а), двома (б) і трьома (в) інтервалами оптимального руху з урахуванням замкненої кривої граничного циклу

Розв'язок систему рівнянь (28) і (29) має вид:

$$\begin{aligned} \bar{z}_{21} &= \frac{U^+ + U^-}{2U^+ + U^-} \cdot z_{3K}'' + \frac{U^+}{2U^+ + U^-} \cdot z_{20}''; \\ \bar{z}_{22} &= \frac{U^+}{2U^+ + U^-} \cdot z_{3K}'' + \frac{U^+ + U^-}{2U^+ + U^-} \cdot z_{20}'' . \end{aligned} \quad (30)$$

Для рівнянь при варіанті $\{U^-; U^+; U^-\}$ (рис. 1, в):

в точці перетину між першим і другим інтервалами руху

$$\begin{cases} \bar{z}'_{21} = z_{3K}'' + U^- \cdot T_{1OPT} \Big|_{t_{mn}''}; \\ \bar{z}'_{22} = z_{21}' + U^- \cdot T_{2OPT} \Big|_{t_{mn}''}, \end{cases} \quad (31)$$

або

$$\begin{cases} \bar{z}_{22} = z_{21} + U^+ \cdot T_{1OPT} \Big|_{t_{mn}''}; \\ \bar{z}_{20} = z_{22} + U^- \cdot T_{2OPT} \Big|_{t_{mn}''}. \end{cases} \quad (32)$$

Із рівняння системи (30, 31) отримаємо:

$$\bar{z}_{22} = \bar{z}'_{21} \left(1 + \frac{U^+}{U^-} \right) - z_{3K}'' \cdot \frac{U^+}{U^-}; \quad (33)$$

а із рішення рівнянь системи (32) отримаємо:

$$\bar{z}_{22} = \frac{U^-}{U^+ + U^-} \cdot z_{21} + \frac{U^+}{U^+ + U^-} \cdot \bar{z}_{20}. \quad (34)$$

Розв'язок рівнянь системи (33) і (34) має вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{z}_{21} &= \frac{U^+ + U^-}{U^+ + 2U^-} \cdot z_{3K}'' + \frac{U^-}{U^+ + 2U^-} \cdot z_{20}''; \\ \bar{z}_{22} &= \frac{U^-}{U^+ + 2U^-} \cdot z_{3K}'' + \frac{U^+ + U^-}{U^+ + 2U^-} \cdot z_{20}'' . \end{aligned} \quad (35)$$

На закінчення розроблена математична модель поведінки управління веденими тактовими генераторами синхронізації телекомунікаційних мереж з фазовим автопідстроюванням частоти: функціональна і структурна із гіпотетичним і реальним інтегрованим ланцюгами ФНЧ; неоднорідне диференціальне рівняння в тривимірному фазовому просторі.

Багаточленне еквівалентне перетворення і спрощення математичних моделей ведених тактових генераторів до виконаних коагульованих нормальних жорданових форм.

Формули для аналізу тривалості оптимальних за наношвидкодією режимів перехідних процесів синхронізації телекомунікаційних мереж як підвищення якості характеристик тактових генераторів. Метод тривалості зводиться до значень інтервалів оптимальних за наношвидкодією траєкторій руху в тривимірному фазовому просторі і точок координат перетину управляючих збуджень.

Література

1. *Математическая теория оптимальных процессов*/ Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелдзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
2. *Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи: Пер. с англ.* – М.: Мир, 2003. – 456 с.
3. *Тактовая синхронизация в интегральных цифровых сетях электросвязи* / В.И. Борщ, В.П. Гайдар, В.В. Коваль, И.П. Лесовой. – К.: Наукова думка, 1998. – 202 с.
4. *Цифровые сети, цифровые участки и цифровые линейные системы.* – МСЭ/МККТТ. Рек. G.801-G.961. Том III. – 1998. – Вып. III.5.
5. ETSI EN 300 462-4-1 (1998-05). *Transmission and Multiplexing (TM); Generic requirement for synchronization networks; Part 4-1: Timing characteristic of Nave clocks suitable for suitable for synchronization supply of Synchronous Digital Hierarchy (SDH) and Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) equipment.*
6. Sheremet Igor. *The law of a Switching Surface of the Periodic Controlling Excitations in Therms of Optimum Speed of Response of a Movement in a Three-Dimensional Phase Space of Synchronization Network.* TCSET'2006, Lviv-Slavsko, Ukraine. – P. 549-550.