

УДК 681.325.3; 531.77.082

Модель преобразователя двухполярного напряжения в частоту при его работе на малых напряжениях в условиях фоновой помехи и температурных изменений (совместно с компенсационным гироскопом)

А. А. Захаров.

Аннотация

Рассматривается описание характеристик преобразователя двухполярного напряжения в частоту (ПДНЧ) при малых напряжениях в условиях входной фоновой помехи, случайной ошибки запуска и температурных изменений. На основании ранее разработанной модели “идеального” ПДНЧ определено линейаризованное выражение математического ожидания (МО) средней частоты ПДНЧ (в зависимости от малой постоянной составляющей входного напряжения). При этом получена функциональная зависимость указанного МО от температуры ПДНЧ. Для алгоритмической коррекции погрешностей преобразователя предложены методы измерения параметров нулевой зоны ПДНЧ при совместной его работе с двухмассовым гироскопическим измерителем угловой скорости.

Ключевые слова

модель, преобразователь двухполярного напряжения в частоту, малые входные напряжения, работа в условиях фоновой помехи, температурные изменения, случайная ошибка запуска, средняя разностная (выходная) частота, гироскопический датчик угловой скорости компенсационного типа, динамически настраиваемый гироскоп, математическое ожидание.

1. Постановка задачи

При выполнении систем управления и навигации движущихся объектов, в каналах передачи сигналов от датчиков аналоговой первичной информации (например, от акселерометров и гироскопических датчиков угловых скоростей компенсационного типа (ГДУСК)) ис-

пользуются устройства, включающие однотипные преобразователи двухполярного напряжения в частоту (ПДНЧ) [1, 2].

ПДНЧ имеет достаточную контролируемую линейность выходной частоты в диапазоне значительных входных напряжений. При малых сигналах зависимость этой частоты от напряжения разработчиками не оговаривается [3]. Для проведения алгоритмической коррекции погрешностей датчиков первичной информации в их штатной работе, необходимы данные, полученные при технологических измерениях нулевых сигналов этих датчиков. Подобные измерения с ГДУСК сопровождаются фоновой (периодической) помехой. Составляющая сигнала помехи преобладает над полезной (постоянной) составляющей сигнала, особенно для ГДУСК, построенных на базе динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ) [4]. Здесь, вследствие значительной допускаемой динамической несбалансированности ротора [5] ДНГ (из-за технологических затруднений) и обеспечения быстродействия измерений (т.е. расширения частотной полосы пропускания ГДУСК), амплитуда фоновой помехи может быть больше измеряемого сигнала в десятки и сотни раз. Работа [6] исследует зависимости выходных параметров информации с ПДНЧ от входного аналогового сигнала (например, с ГДУСК – ДНГ) в области малых сигналов в условиях частотной помехи. При этом выходные характеристики ПДНЧ считаются стабильными и не зависящими от температурных условий. Однако на практике имеют место температурные и случайные изменения указанных характеристик. Данная работа рассматривает эти изменения, а также соответствующие технологические измерения параметров нулевой зоны реального преобразователя. Указанные параметры необходимы для алгоритмической коррекции погрешностей ПДНЧ и ГДУСК.

2. Переход к характеристикам реального ПДНЧ

Условимся называть ПДНЧ, неподверженный температурным и случайным изменениям, идеальным (ИПДНЧ), и зависимости, полученные в [6], отражают свойства ИПДНЧ.

Выходная частота реального ПДНЧ (в отличие от ИПДНЧ) при равном нулю входном напряжении не равна нулю, а изменяется при повторных включениях и нагреве его платы с электрическими элементами. Этот уход частоты можно объяснить нестабильностью и тепловым дрейфом параметров некоторых полупроводниковых элементов входной аналоговой части [1,7] схемы ПДНЧ. Учитываем изменение указанной частоты эквивалентным влиянием приведенной к входу электродвижущей силы (ЭДС) и считаем, что реальный ПДНЧ (или просто ПДНЧ) (см. рис.1) включает ИПДНЧ и источник приведенной ЭДС (E [мВ]). Так что в данной модели ПДНЧ, по правилу Киргофа:

$$u_{\text{вхр}}(t) = u_{\text{вх}}(t) - E, \quad (2.1)$$

где: $u_{\text{вхр}}(t)$ – напряжение [мВ] на входе реального ПДНЧ; $u_{\text{вх}}(t)$ – напряжение на входе ИПДНЧ;

$$E = E_{\text{сл}} + E_{\text{сс}}(t_{\text{окр}}). \quad (2.2)$$

$E_{\text{сл}}$, $E_{\text{сс}}(t_{\text{окр}})$ – составляющие ЭДС [мВ]: случайная (постоянная после включения и изменяющаяся при повторных включениях, считаем распределённой по нормальному закону, с математическим ожиданием равным нулю и среднеквадратическим отклонением $\sigma(E_{\text{сл}})$) и систематическая (зависящая от температуры $t_{\text{окр}}$ [град.С] воздуха, окружающего входные цепи ПДНЧ).

$$E_{\text{сл}} = -E_{\text{сл м}} \dots E_{\text{сл м}}; \quad (2.3)$$

$$E_{\text{сс}}(t_{\text{окр}}) = E_{\text{сс}}(t_{\text{окр}} = 0) + C_E \cdot t_{\text{окр}}, \quad (2.4)$$

где: $E_{\text{сл м}}$ – максимальное значение [мВ] случайной составляющей ЭДС, практически считаем [8,9]: $E_{\text{сл м}} = 3\sigma(E_{\text{сл}})$; C_E – коэффициент [мВ/град.С] влияния температуры на ЭДС.

Принимаем состав $u_{\text{вх}}(t)$ [6]: $u_{\text{вх}}(t) = U_{\text{п}} + u_{\text{пер}}(t) \quad (2.5)$

где: $U_{\text{п}}$, $u_{\text{пер}}(t)$ – постоянная и переменная составляющие [мВ] напряжения на входе ИПДНЧ.

Подставляем (2.5) в (2.1).

$$u_{\text{вхр}}(t) = U_{\text{п}} + u_{\text{пер}}(t) - E = U + u_{\text{пер}}(t), \quad (2.6)$$

Как видно из (2.6) входное напряжение ПДНЧ содержит постоянную ($U = U_{\text{п}} - E$) и переменную (такую же как на входе ИПДНЧ, $u_{\text{пер}}(t)$) составляющие. Соответственно $U_{\text{п}}$ представим в виде:

$$U_{\text{п}} = U + E. \quad (2.7)$$

Разностная (выходная) частота ПДНЧ определяется выражением как для ИПДНЧ ([6](3.5)):

$$f_{\text{раз}}(t) = \begin{cases} f_0^+ + K_f \cdot u_{\text{вх}}(t), & \text{при } u_{\text{вх}}(t) > U_{\text{гр}}^+; \\ K_{0f} \cdot u_{\text{вх}}(t), & \text{при } U_{\text{гр}}^+ \geq u_{\text{вх}}(t) \geq -U_{\text{гр}}^-; \\ -f_0^- + K_f \cdot u_{\text{вх}}(t), & \text{при } u_{\text{вх}}(t) < -U_{\text{гр}}^-, \end{cases} \quad (2.8)$$

где: $U_{гр}^+$, $-U_{гр}^-$ – граничные значения [МВ] напряжения $u_{вх}(t)$; K_{0f} , K_f – коэффициенты [Гц/МВ] преобразования; f_0^+ , $-f_0^-$ – начальные постоянные смещения [Гц] характеристики ПДНЧ.

3. Параметры ПДНЧ при отсутствии фоновой помехи

Разностная частота при отсутствии фоновой помехи ($u_{пер}(t)$) из (2.5),(2.7),(2.8):

$$f_{раз} = \begin{cases} f_0^+ + K_f \cdot U_{п}, & \text{при } U_{п} > U_{гр}^+; \\ K_{0f} \cdot U_{п}, & \text{при } U_{гр}^+ \geq U_{п} \geq -U_{гр}^-; \\ -f_0^- + K_f \cdot U_{п}, & \text{при } U_{п} < -U_{гр}^-. \end{cases} = \begin{cases} f_0^+ + K_f \cdot (U + E), & \text{при } U > U_{гр}^+ - E; \\ K_{0f} \cdot (U + E), & \text{при } U_{гр}^+ - E \geq U \geq -U_{гр}^- - E; \\ -f_0^- + K_f \cdot (U + E), & \text{при } U < -U_{гр}^- - E. \end{cases} \quad (3.1)$$

Расчетные зависимости $f_{раз}(U_{п})$, $f_{раз}(U)$ (при $u_{пер}(t)=0$) (3.1) показаны на рис. 2,а,б сплошной ломаной линией. Практические зависимости - штриховой линией.

Вводим граничные значения ($t_{окр}^{гр+}$, $t_{окр}^{гр-}$) температуры для данного ПДНЧ и считаем, что

$$E(t_{окр} = t_{окр}^{гр+}) = U_{гр}^+; \quad E(t_{окр} = t_{окр}^{гр-}) = -U_{гр}^-. \quad (3.2)$$

На рис. 3а приведён график $E(t_{окр})$ с граничными значениями (3.2). Откуда следует:

$$|E(t_{окр})| / (U_{гр}^+ + U_{гр}^-) = |t_{окр}^{E0} - t_{окр}| / (t_{окр}^{гр-} - t_{окр}^{гр+}),$$

где $t_{окр}^{E0}$ – окружающая температура, при которой $E=0$. На этом же рис. 3а отмечены крайние значения эксплуатационного диапазона температур (нижнее $t_{эн}$ и верхнее $t_{эв}$). Соответственно

$$|E(t_{эн})| / (U_{гр}^+ + U_{гр}^-) = |t_{окр}^{E0} - t_{эн}| / (t_{окр}^{гр-} - t_{окр}^{гр+}); \quad |E(t_{эв})| / (U_{гр}^+ + U_{гр}^-) = |t_{окр}^{E0} - t_{эв}| / (t_{окр}^{гр-} - t_{окр}^{гр+}). \quad (3.)$$

Из (3.2) с учётом (2.2),(2.4):

$$t_{окр}^{гр+} = (U_{гр}^+ - E_{сл} - E_{сс}(t_{окр} = 0)) / C_E, \quad t_{окр}^{гр-} = (-U_{гр}^- - E_{сл} - E_{сс}(t_{окр} = 0)) / C_E. \quad (3.4)$$

Обозначим через $f_{кз}$ [Гц] разностную частоту при замкнутом накоротко (заземленном) входе ПДНЧ и учитываем (2.7).

$$f_{кз} = f_{раз}(u_{вхр}(t) = 0) = f_{раз}(U = 0, u_{пер}(t) = 0) = f_{раз}(U_{п} = E, u_{пер}(t) = 0).$$

Значение $f_{кз}$ отмечено на рис. 2,а,б. Из выражений $f_{кз}$, (3.1),(3.2) и рис. 3,а запишем:

$$f_{кз} = \begin{cases} f_0^+ + K_f \cdot E, & \text{при } E > U_{гр}^+ \dots \text{или} \dots t_{окр} < t_{окр}^{гр+}; \\ K_{0f} \cdot E, & \text{при } U_{гр}^+ \geq E \geq -U_{гр}^- \dots \text{или} \dots t_{окр}^{гр+} \leq t_{окр} \leq t_{окр}^{гр-}; \\ -f_0^- + K_f \cdot E, & \text{при } E < -U_{гр}^- \dots \text{или} \dots t_{окр} > t_{окр}^{гр-}. \end{cases} \quad (3.5)$$

Вводим граничные значения $f_{кз}$, соответствующие (3.2) и отмеченные на рис. 2,а,б,

$$f_{кз}^{гр+} = f_{кз}(E = U_{гр}^+), \quad f_{кз}^{гр-} = f_{кз}(E = -U_{гр}^-).$$

Подставляем (2.2),(2.4) в (3.5) и находим выражение температурной зависимости $f_{кз}(t_{окр})$.

$$f_{кз} = \begin{cases} f_0^+ + K_f \cdot (E_{сл} + E_{сс}(t_{окр} = 0) + C_E \cdot t_{окр}), & \text{при } t_{окр} < t_{окр}^{гр+}; \\ K_{0f} \cdot (E_{сл} + E_{сс}(t_{окр} = 0) + C_E \cdot t_{окр}), & \text{при } t_{окр}^{гр+} \leq t_{окр} \leq t_{окр}^{гр-}; \\ -f_0^- + K_f \cdot (E_{сл} + E_{сс}(t_{окр} = 0) + C_E \cdot t_{окр}), & \text{при } t_{окр} > t_{окр}^{гр-}. \end{cases} \quad (3.6)$$

После дифференцирования имеем коэффициент ($C_{f_{кз}}$ [мВ/град.С]) влияния $t_{окр}$ на $f_{кз}$.

$$C_{f_{кз}} = \frac{\partial f_{кз}}{\partial t_{окр}} = \begin{cases} K_f \cdot C_E, & \text{при } t_{окр} < t_{окр}^{гр+}; \\ K_{0f} \cdot C_E, & \text{при } t_{окр}^{гр+} \leq t_{окр} \leq t_{окр}^{гр-}; \\ K_f \cdot C_E, & \text{при } t_{окр} > t_{окр}^{гр-}. \end{cases} \quad (3.7)$$

Графики функции $f_{кз}(t_{окр})$ (3.6) (для двух крайних значений $E_{сл}$ из (2.3)) приведены на рис 3,б с указанием соответствующих граничных значений температуры (нижних $t_{окрн}^{гр+}$, $t_{окрн}^{гр-}$ и верхних $t_{окрв}^{гр+}$, $t_{окрв}^{гр-}$), подсчитанных по (3.4). Учитывая (2.2),(2.4), представим $f_{кз}$ в (3.6) суммой случайной ($f_{кз\text{ сл}}$) и систематической ($f_{кз\text{ сс}}(t_{окр})$) составляющих:

$$f_{кз} = f_{кз\text{ сл}} + f_{кз\text{ сс}}(t_{окр}). \quad (3.8)$$

$$f_{кз\text{ сл}} = \begin{cases} K_f \cdot E_{сл}, & \text{при } E > U_{гр}^+ \dots \text{или} \dots t_{окр} < t_{окр}^{гр+}; \\ K_{0f} \cdot E_{сл}, & \text{при } U_{гр}^+ \geq E \geq -U_{гр}^- \dots \text{или} \dots t_{окр}^{гр+} \leq t_{окр} \leq t_{окр}^{гр-}; \\ K_f \cdot E_{сл}, & \text{при } E < -U_{гр}^- \dots \text{или} \dots t_{окр} > t_{окр}^{гр-}, \end{cases} \quad (3.9)$$

$$f_{кз\text{ сс}}(t_{окр}) = \begin{cases} f_0^+ + K_f \cdot E_{сс}(t_{окр}), & \text{при } E > U_{гр}^+ \dots \text{или} \dots t_{окр} < t_{окр}^{гр+}; \\ K_{0f} \cdot E_{сс}(t_{окр}), & \text{при } U_{гр}^+ \geq E \geq -U_{гр}^- \dots \text{или} \dots t_{окр}^{гр+} \leq t_{окр} \leq t_{окр}^{гр-}; \\ -f_0^- + K_f \cdot E_{сс}(t_{окр}), & \text{при } E < -U_{гр}^- \dots \text{или} \dots t_{окр} > t_{окр}^{гр-}. \end{cases} \quad (3.10)$$

Значение $f_{кз}$ может быть измерено экспериментально. При этом необходимо отключить вход ПДНЧ от внешних источников, подключить этот вход к малому сопротивлению

$R_{MC} [Ом] \rightarrow 0$ (см. рис. 4), включить ПДНЧ и, с помощью технологической аппаратуры (см. [6] рис.1,б), провести подсчёт числа N_{K3} импульсов за время $S_{K3} [с]$ (1-2 мин.). При этом измеренное значение f_{K3} равно $f_{K3 \text{ изм}} = N_{K3}/S_{K3}$ и в литературе иногда называется усреднённой выходной частотой при заземлённом входе.

Однако, из-за неполноценного закорачивания ($R_{MC} \neq 0$), по законам электротехники из рис. 4: $U = -E + E \cdot R_{BX} / (R_{BX} + R_{MC}) \neq 0$ (где R_{BX} – входное сопротивление [Ом] ПДНЧ), и $f_{K3 \text{ изм}}$ определяется уже не из (3.5), а из (3.1). При этом возникает погрешность измерений, и модуль относительной ошибки ($|\delta_{f_{K3}}|$) определения f_{K3} (при $t_{окр}^{гр+} \leq t_{окр} \leq t_{окр}^{гр-}$) равен

$$\begin{aligned} |\delta_{f_{K3}}| &= 100\% \cdot \left| (f_{K3 \text{ изм}} - f_{K3}) / f_{K3} \right| = 100\% \cdot |K_{0f} \cdot (U + E) - K_{0f} \cdot E| / |K_{0f} \cdot E| = \\ &= 100\% \cdot \left| -E \cdot R_{MC} / (R_{BX} + R_{MC}) \right| / E = 100\% \cdot R_{MC} / (R_{BX} + R_{MC}). \end{aligned} \quad (3.11)$$

Проводя несколько включений при данной температуре с получением статистики $f_{K3 \text{ изм}}$, общеизвестными методами [8,9] могут быть выделены систематика $f_{K3 \text{ изм сс}}(t_{окр})$ и среднеквадратическое отклонение (от нуля) $\sigma(f_{K3 \text{ изм сл}})$ случайной составляющей $f_{K3 \text{ изм сл}}$.

Как показали испытания 3-х ПДНЧ на микросхеме K1468БКУ-02 [3], в эксплуатационном диапазоне температур ($t_{ЭН} = -55^{\circ}C \leq t_{окр} \leq t_{ЭВ} = 60^{\circ}C$) значения систематики $f_{K3 \text{ изм сс}}(t_{окр})$ зависели от температуры практически линейно. Соответственно для 1-го и 2-го ПДНЧ $t_{окр}^{гр+} < t_{ЭН}$, $t_{окр}^{гр-} > t_{ЭВ}$ (эксплуатационный диапазон находился внутри граничного интервала температур, присущего этим ПДНЧ). Коэффициенты $C_{f_{K3}}$ составляли соответственно $-0,037$ и $-0,047$, а значения $t_{окр}^{E0}$: $-7^{\circ}C$, $6^{\circ}C$. Для третьего ПДНЧ наблюдалась линейная зависимость с изломом графика $f_{K3 \text{ изм сс}}(t_{окр})$ (на “колене” практической кривой) с координатами $t_{окр}^{гр+} = -25^{\circ}C$, $f_{K3}^{гр+} = 0,85$ Гц. Здесь $t_{окр}^{гр+} > t_{ЭН}$, $t_{окр}^{гр-} > t_{ЭВ}$. При $-25^{\circ}C \leq t_{окр} \leq 60^{\circ}C$ коэффициент $C_{f_{K3}} = -0,067$, а при $-55^{\circ}C \leq t_{окр} \leq -25^{\circ}C$ $C_{f_{K3}} =$

$-0,015 \dots -0,035$. Значение $t_{\text{окр}}^{E0} : -10^{\circ}\text{C}$. Для последнего ПДНЧ, используя (3.3) (с заменой $t_{\text{окр}}^{\text{гр}-}$ на $t_{\text{эв}}$), определяем:

$$|E_{\text{сс}}(t_{\text{эв}})| / (U_{\text{гр}}^+ + U_{\text{гр}}^-) < |t_{\text{окр}}^{E0} - t_{\text{эв}}| / (t_{\text{эв}} - t_{\text{окр}}^{\text{гр}+}) = |-10 - (-55)| / (60 - (-25)) = 0,53;$$

$$|E_{\text{сс}}(t_{\text{эв}})| / (U_{\text{гр}}^+ + U_{\text{гр}}^-) < |t_{\text{окр}}^{E0} - t_{\text{эв}}| / (t_{\text{эв}} - t_{\text{окр}}^{\text{гр}+}) = |-10 - 60| / (60 - (-25)) = 0,82.$$

Аналогично для 1-го и 2-го ПДНЧ (с заменой $t_{\text{окр}}^{\text{гр}-}$ на $t_{\text{эв}}$ и $t_{\text{окр}}^{\text{гр}+}$ на $t_{\text{эв}}$)

$$|E_{\text{сс}}(t_{\text{эв}})| / (U_{\text{гр}}^+ + U_{\text{гр}}^-) < |t_{\text{окр}}^{E0} - t_{\text{эв}}| / (t_{\text{эв}} - t_{\text{эв}}) = |-7 - (-55)| / (60 - (-55)) = 0,42; |6 - (-55)| / (60 - (-55)) = 0,43;$$

$$|E_{\text{сс}}(t_{\text{эв}})| / (U_{\text{гр}}^+ + U_{\text{гр}}^-) < |t_{\text{окр}}^{E0} - t_{\text{эв}}| / (t_{\text{эв}} - t_{\text{эв}}) = |-7 - 60| / (60 - (-55)) = 0,58; |6 - 60| / (60 - (-55)) = 0,47.$$

Отсюда, с учётом составляющей $E_{\text{сл}}$, для ПДНЧ данного типа, работающих в эксплуатационном диапазоне температур, ориентировочно можно принять

$$|E| < (U_{\text{гр}}^+ + U_{\text{гр}}^-) \quad (3.12)$$

4. Математическое ожидание выходной частоты ПДНЧ при наличии малых сигналов и фоновой помехи на его входе

Возвращаемся к характеристикам ПДНЧ, когда в (2.5), (2.6) $u_{\text{пер}}(t) \neq 0$. Рассмотрим, например, совместную работу ПДНЧ с ГДУСК.

В соответствии с [2] и рис. 5, на вход ПДНЧ поступает напряжение с нагрузочного резистора R , включенного последовательно с обмоткой датчика момента (ДМ) гироблока ГДУСК и выходом усилителя обратной связи (УОС) ГДУСК. По обмотке ДМ протекает ток с постоянной составляющей $I_{\text{дмп}}$ [мА], определяемой проекцией угловой скорости гироблока ГДУСК на его измерительную ось [2,4,9]. И постоянная составляющая U из (4.7) (по закону Ома) равна

$$U = I_{\text{дмп}} \cdot R_{\text{э}}, \quad (4.1)$$

где $R_{\text{э}}$ – эквивалентное сопротивление постоянному току, соответствующее параллельному соединению R и $R_{\text{вх}}$,

$$R_{\text{э}} = R / (1 + R / R_{\text{вх}}). \quad (4.2)$$

Переменная составляющая тока обмотки ДМ вызывает фоновую помеху входного напряжения ПДНЧ. Она образует переменную составляющую ($u_{\text{пер}}(t)$), например синусои-

дальнюю, амплитуда которой (U_M [мВ]) может быть измерена. Таким образом, определяется (2.8) выходная частота ПДНЧ, так как, с учётом (2.6),(2.7), известны все составляющие напряжения $u_{вх}(t)$. И далее можно применить математический аппарат [6], использующий (2.8) и разработанный для ИПДНЧ. Тогда аналогично [6] выходные информационные параметры ПДНЧ - средняя разностная частота f_T , определённая за малое время цикла T [с] счёта реверсивного счётчика РС (цикла обновления информации), и средняя разностная частота f_S , определённая за время S [с] (технологического измерения), кратное T и превосходящее T в десятки тысяч раз, - являются случайными величинами с одинаковым математическим ожиданием (МО) m_f [Гц]. При таком значительном времени S подсчёта числа N_S импульсов технологической аппаратурой (см. рис.5 и ([6] рис.1,б)) можно [6] считать

$$m_f \approx f_S = N_S/S. \quad (4.3)$$

$$\text{При практической фоновой помехе ГДУСК } (U_{гр}^+/U_M \approx U_{гр}^-/U_M \approx 0) \quad (4.4)$$

вид $m_f(U_{п})$ дан в [6] для приближённо расширенных диапазонов изменения $U_{п}$. Так (см. рис. 6)

для диапазонов $U_{п} < -U_M$ и $U_{п} > U_M$ (соответственно):

$$m_f(U_{п}) = K_f \cdot U_{п} - f_0^-, \quad m_f(U_{п}) = K_f \cdot U_{п} + f_0^+; \quad (4.5)$$

$$\text{для диапазона } |U_{п}| < U_M: m_f(U_{п}) \approx K_f \cdot U_{п} + f_{0српр}(U_{п}), \quad (4.6)$$

$$\text{где } f_{0српр}(U_{п}) = \frac{f_0^+ + f_0^-}{\pi} \cdot \arccos\left(-\frac{U_{п}}{U_M}\right) - f_0^-. \quad (4.7)$$

Начальное значение ($f_{0п}$) функции $m_f(U_{п})$ (4.6) (отмеченное на рис.6) равно

$$f_{0п} = m_f(U_{п} = 0) \approx f_{0ппр},$$

$$(4.8)$$

где $f_{0ппр}$ - приближенное начальное значение функции $m_f(U_{п})$.

$$f_{0ппр} = f_{0српр}(U_{п} = 0) = 0,5 \cdot (f_0^+ - f_0^-). \quad (4.9)$$

Для получения искомой зависимости $m_f(U)$ (МО средней разностной частоты от значения постоянной составляющей входного напряжения ПДНЧ), подставляем (2.7) в (4.5),(4.6) и в выражения соответствующих диапазонов изменения $U_{п}$. Иначе говоря, график

функции $m_f(U)$ (рис. 7, с приближенно расширенными диапазонами изменения U) может быть получен сдвигом графика $m_f(U_{\Pi})$ (рис. 6) влево, на расстояние “Е”. Тогда (см. рис. 7)

для диапазонов $U < -U_M - E$, $U > U_M - E$ (соответственно):

$$m_f(U) = K_f \cdot U + K_f \cdot E - f_0^- = K_f \cdot U + f_H^-; \quad m_f(U) = K_f \cdot U + K_f \cdot e + f_0^+ = K_f \cdot U + f_H^+, \quad (4.10)$$

где f_H^- , f_H^+ - начальные значения функций $m_f(U)$ из (4.10);

для диапазона $|U + E| < U_M$ (или $-U_M - E < U < U_M - E$):

$$m_f(U) \approx K_f \cdot (U + E) + f_{0\text{српр}}(U_{\Pi} = U + E; E/U_M \approx 0) = K_f \cdot (U + E) + \frac{f_0^+ + f_0^-}{\pi} \cdot \arccos\left(-\frac{U}{U_M}\right) - f_0^- \cdot (4.11)$$

Так как функция $f_{0\text{српр}}(U_{\Pi})$ определена [6] в условиях (4.4), то с учётом (3.12) здесь $E/U_M \approx 0$. На графике (см. рис. 7) функции $m_f(U)$ (4.11) отмечено её начальное значение f_0 .

Найдем значение f_0 , подставляя $U = 0$ в (4.11) и учитывая (4.8),(4.9).

$$f_0 = m_f(U = 0) \approx K_f \cdot E + 0,5 \cdot (f_0^+ - f_0^-) \approx K_f \cdot E + f_{0\Pi}. \quad (4.12)$$

Обозначим первую составляющую (4.12) как f_{0T} и примем во внимание (2.2),(2.4):

$$f_{0T} = K_f \cdot E = f_{0T \text{ сл}} + f_{0T \text{ сс}}(t_{\text{окр}}), \quad (4.13)$$

где $f_{0T \text{ сл}}$, $f_{0T \text{ сс}}(t_{\text{окр}})$ - соответственно случайная (постоянная после включения и изменяющаяся от включения к включению с математическим ожиданием равным нулю) и систематическая составляющие значения f_{0T} .

$$f_{0T \text{ сл}} = K_f \cdot E_{\text{сл}}; \quad (4.14)$$

$$f_{0T \text{ сс}}(t_{\text{окр}}) = K_f \cdot E_{\text{сс}}(t_{\text{окр}}) = f_{0T \text{ сс}}(t_{\text{окр}} = 0) + C_{f_{0T}} \cdot t_{\text{окр}}, \quad (4.15)$$

где $C_{f_{0T}}$ - коэффициент [Гц/град. С] влияния температуры на f_{0T} ; из (2.4), (4.13), (4.15)

$$C_{f_{0T}} = \frac{\partial f_{0T}}{\partial t_{\text{окр}}} = K_f \cdot \frac{\partial E_{\text{сс}}}{\partial t_{\text{окр}}} = K_f \cdot C_E = \text{const}; \quad (4.16)$$

$$f_{0T \text{ сс}}(t_{\text{окр}} = 0) = K_f \cdot E_{\text{сс}}(t_{\text{окр}} = 0).$$

При сравнении (3.5) с (4.13), (3.10) с (4.15), (3.9) с (4.14) и (3.7) с (4.16) соответственно следует

$$f_{0T} = \begin{cases} f_{кз} - f_0^+, & \text{при } t_{окр} < t_{окр}^{гр+}; \\ \frac{K_f}{K_{0f}} \cdot f_{кз}, & \text{при } t_{окр}^{гр+} \leq t_{окр} \leq t_{окр}^{гр-}; \\ f_{кз} + f_0^-, & \text{при } t_{окр} > t_{окр}^{гр-}, \end{cases} \quad (4.17)$$

$$f_{0T \text{ сс}}(t_{окр}) = \begin{cases} f_{кз \text{ сс}}(t_{окр}) - f_0^+, & \text{при } t_{окр} < t_{окр}^{гр+}; \\ \frac{K_f}{K_{0f}} \cdot f_{кз \text{ сс}}(t_{окр}), & \text{при } t_{окр}^{гр+} \leq t_{окр} \leq t_{окр}^{гр-}; \\ f_{кз \text{ сс}}(t_{окр}) + f_0^-, & \text{при } t_{окр} > t_{окр}^{гр-}, \end{cases} \quad (4.18)$$

$$f_{0T \text{ сл}} / f_{кз \text{ сл}} = C_{f_{0T}} / C_{f_{кз}} = \begin{cases} 1, & \text{при } t_{окр} < t_{окр}^{гр+}; \\ \frac{K_f}{K_{0f}}, & \text{при } t_{окр}^{гр+} \leq t_{окр} \leq t_{окр}^{гр-}; \\ 1, & \text{при } t_{окр} > t_{окр}^{гр-}. \end{cases} \quad (4.19)$$

$$\text{При этом можно принять: } f_{0T \text{ сл}} / f_{кз \text{ сл}} = \sigma(f_{0T \text{ сл}}) / \sigma(f_{кз \text{ сл}}). \quad (4.20)$$

С учетом (4.13), начальные значения из (4.10) $f_H^- = f_{0T} - f_0^-$, $f_H^+ = f_{0T} + f_0^+$, а начальное значение f_0 из (4.12),(4.15) составит:

$$f_0 \approx f_{0T \text{ сл}} + f_{0T \text{ сс}}(t_{окр}) + f_{0П} = f_{0T \text{ сл}} + f_{0T \text{ сс}}(t_{окр} = 0) + C_{f_{0T}} \cdot t_{окр} + f_{0П}. \quad (4.21)$$

Представим начальное значение f_0 (4.21) в виде суммы случайной $f_{0 \text{ сл}}$ (постоянной после включения и изменяющейся от включения к включению, с МО равным нулю) и систематической $f_{0 \text{ сс}}(t_{окр})$ (зависящей линейно с коэффициентом влияния C_{f_0}) составляющих:

$$f_0 = f_0(t_{окр}, f_{0 \text{ сл}}) = f_{0 \text{ сл}} + f_{0 \text{ сс}}(t_{окр}) = f_{0 \text{ сл}} + f_{0 \text{ сс}}(t_{окр} = 0) + C_{f_0} \cdot t_{окр}. \quad (4.22)$$

При сравнении (4.21) с (7.22) видно, что

$$f_{0 \text{ сл}} = f_{0T \text{ сл}}; \quad C_{f_0} = C_{f_{0T}}; \quad f_{0 \text{ сс}}(t_{окр} = 0) \approx f_{0T \text{ сс}}(t_{окр} = 0) + f_{0П}; \quad (4.23)$$

$$f_{0\text{ cc}}(t_{\text{окр}}) \approx f_{0\text{т cc}}(t_{\text{окр}}) + f_{0\text{п}}. \quad (4.24)$$

В результате имеем

$$f_{0\text{ cc}}(t_{\text{окр}}) = f_{0\text{ cc}}(t_{\text{окр}} = 0) + C_{f0\text{т}} \cdot t_{\text{окр}} \quad (4.25)$$

Линеаризуем функцию $m_f(U)$ в районе $U \approx 0$. Коэффициент (K_{fl}) преобразования линеаризованной функции находим дифференцированием (4.11):

$$K_{\text{fl}} = \left. \frac{dm_f(U)}{dU} \right|_{(U=0)} \approx K_{\text{flпр}},$$

где $K_{\text{flпр}}$ - приближенное значение коэффициента преобразования K_{fl} .

$$K_{\text{flпр}} = K_f + \frac{f_0^+ + f_0^-}{\pi \cdot U_M}. \quad (4.26)$$

Зависимость $m_{\text{fl}}(U)$, являющаяся результатом линеаризации функции $m_f(U)$ вблизи нулевых значений U и проходящая через точку $(U=0, f_0)$, имеет вид

$$m_{\text{fl}}(U) = K_{\text{fl}} \cdot U + f_0. \quad (4.27)$$

График $m_{\text{fl}}(U)$ представлен на рис. 7 тонкой линией. Для малых значений U

$$m_f(U) \approx m_{\text{fl}}(U) \approx K_{\text{flпр}} \cdot U + f_0. \quad (4.28)$$

Зависимость $m_{\text{fl}}(U)$ от температуры и от включения к включению определяется подстановкой (4.22) в (4.27) и выражается формулой:

$$m_{\text{fl}}(U, t_{\text{окр}}, f_{0\text{ сл}}) = K_{\text{fl}} \cdot U + f_0(t_{\text{окр}}, f_{0\text{ сл}}) = K_{\text{fl}} \cdot U + f_{0\text{ cc}}(t_{\text{окр}}) + f_{0\text{ сл}}. \quad (4.29)$$

5. Методы оценки параметров нулевой зоны ПДНЧ

Найденные приближенные выражения линеаризованной функции МО средней выходной частоты ПДНЧ могут быть использованы для определения параметров ПДНЧ при его работе совместно с двухмасштабным ГДУСК. Оценивание этих параметров осуществляется при малых значениях U/U_M (например, при измерении какой-либо проекции скорости вращения Земли на неподвижном основании). Понимая, что получаемые оценки также приближенные, для удобства будем записывать уравнения из указанных выражений – точными.

Для нахождения оценки $\langle K_{\text{fl}} \rangle$ коэффициента K_{fl} можно воспользоваться формулой (4.26). Если при этом параметры f_0^+, f_0^- – неизвестны, то необходимо использовать их мак-

симально допустимые значения $f_{0д}$ (из справочных данных) следующим образом. Запишем систему неравенств с учетом (4.9).

$$0 < f_0^+ < f_{0д}; \quad 0 < f_0^- < f_{0д}; \quad f_0^+ = 2 \cdot f_{0ппр} + f_0^-.$$

Решая систему, находим диапазон возможных (расчетных) значений сумм $(f_0^+ + f_0^-)$.

$$(f_0^+ + f_0^-)_p = \left[(f_0^+ + f_0^-)_{p \text{ ср}} - \Delta f_p \right] \dots \left[(f_0^+ + f_0^-)_{p \text{ ср}} + \Delta f_p \right],$$

где $(f_0^+ + f_0^-)_{p \text{ ср}}$, Δf_p - соответственно среднее значение и модуль максимального отклонения от среднего расчетных сумм $(f_0^+ + f_0^-)$. При этом

$$(f_0^+ + f_0^-)_{p \text{ ср}} = f_{0д}, \quad \Delta f_p = f_{0д} - 2 \cdot |f_{0ппр}| > 0. \quad (5.1)$$

Крайние значения ($K_{fл \text{ к}}$) коэффициента $K_{fл}$ из (4.26) равны:

$$K_{fл \text{ к}} = K_f + \frac{(f_0^+ + f_0^-)_{p \text{ ср}} \pm \Delta f_p}{\pi \cdot U_M} = K_{fл \text{ ср}} \pm \Delta K_{fл},$$

где $K_{fл \text{ ср}}$, $\Delta K_{fл}$ - среднее значение коэффициента $K_{fл}$ и модуль максимального отклонения $K_{fл}$ от среднего.

С учетом (5.1)

$$K_{fл \text{ ср}} = K_f + \frac{f_{0д}}{\pi \cdot U_M}; \quad (5.2)$$

$$\Delta K_{fл} = \frac{f_{0д} - 2 \cdot |f_{0ппр}|}{\pi \cdot U_M}. \quad (5.3)$$

Оценкой $\langle K_{fл} \rangle$ коэффициента $K_{fл}$ можно считать среднее значение (5.2):

$$\langle K_{fл} \rangle = K_{fл \text{ ср}}, \quad (5.4)$$

если максимальная относительная ошибка отличия $K_{fл \text{ ср}}$ от значения $K_{fл}$

$$\delta K_{fл} = 100\% \cdot \Delta K_{fл} / K_{fл \text{ ср}} \quad (5.5)$$

– достаточно мала, и подсчитанное значение $\Delta K_{fл}$ из (5.3) (с учетом (5.1)) – больше нуля.

Двухмасштабный ГДУСК измеряет малые угловые скорости с уменьшенной жесткостью своей электрической пружины (режим измерений с масштабом М1) и большие скорости – с повышенной жесткостью (режим с масштабом М2). Переход из одного режима в дру-

гой осуществляется автоматически с изменением номинала общего сопротивления R в цепи обратной связи ДУС (см. рис. 5), за счет подключения (или отключения) дополнительного резистора контактами реле по внешней команде (реле и дополнительный резистор на рис. 5 не показаны). Для нахождения параметров нулевой зоны ПДНЧ необходимо обеспечить возможность перехода по команде оператора из режима М1 в М2 при измерениях в одном запуске ротора гироблока ДУС.

Будем обозначать параметры режима М1 с индексом 1, параметры М2 – с индексом 2. Так при работе в масштабе М1 (см. рис. 5) номинал общего сопротивления обратной связи $R=R_1$, при работе в М2 – номинал $R=R_2$. При смене режимов меняется уровень амплитуды U_M и (соответственно) значение коэффициента K_{fl} . Оценим близость коэффициентов K_{fl1} , K_{fl2} к их среднему значению.

За оценку $\langle K_{fl \delta} \rangle$ значения $K_{fl \delta}$, близкого к K_{fl1} и K_{fl2} (с использованием (5.2)) можно принять среднее:

$$\langle K_{fl \delta} \rangle = 0,5 \cdot (K_{fl1 \text{ ср}} + K_{fl2 \text{ ср}}). \quad (5.6)$$

Соответственно оценка относительной ошибки отличия K_{fl1} от K_{fl2} :

$$\langle \delta K_{fl \delta} \rangle = 100\% \cdot \left| K_{fl1 \text{ ср}} - K_{fl2 \text{ ср}} \right| / \langle K_{fl \delta} \rangle. \quad (5.7)$$

Если эта оценка достаточно мала, то можно считать:

$$K_{fl1} \approx K_{fl2} \approx K_{fl \delta}. \quad (5.8)$$

Для оценки в (4.29) значения f_0 (для данной температуры ($t_{окр}$) воздуха, окружающего ПДНЧ) и постоянных составляющих U (соответственно для масштабов М1 и М2), при одной и той же $t_{окр} = t_{окрг}$, в одном и том же запуске ротора гироблока ГДУСК, в одном и том же включении ПДНЧ, проводим два измерения одной и той же проекции скорости Земли с замерах (каждое за время S) числа импульсов (N_{S1} , N_{S2}) в режимах М1 и М2 (соответственно). Определяем среднюю разностную частоту по (4.3).

$$f_{S1}(t_{окр \ r}) = N_{S1}/S; \quad f_{S2}(t_{окр \ r}) = N_{S2}/S.$$

Постоянная составляющая тока ДМ ($I_{дмп}$), определяемая значениями указанной проекции угловой скорости Земли и паразитных моментов, приложенных к ротору гироблока [5], при обоих замерах остается одной и той же. И, при малой ошибке (5.7), в соответствии с (4.1), (4.3), (4.28), (4.29), (5.8), можно составить систему линейных уравнений:

$$f_{S1}(t_{\text{окр } r}) = K_{\text{фл } \delta} \cdot I_{\text{дмп}} \cdot R_{\text{э1}} + f_0(t_{\text{окр } r}, f_0_{\text{сл}});$$

$$f_{S2}(t_{\text{окр } r}) = K_{\text{фл } \delta} \cdot I_{\text{дмп}} \cdot R_{\text{э2}} + f_0(t_{\text{окр } r}, f_0_{\text{сл}}),$$

где $R_{\text{э1}}, R_{\text{э2}}$ – эквивалентные сопротивления, соответствующие параллельному соединению $R_{\text{вх}}$ и R_1, R_2 (соответственно); $f_0(t_{\text{окр } r}, f_0_{\text{сл}})$ – постоянная величина данного включения.

Решая данную систему с учетом (4.22), находим для данного включения ПДНЧ оценку $\langle f_0(t_{\text{окр } r}, f_0_{\text{сл}}) \rangle$ значения $f_0(t_{\text{окр } r}, f_0_{\text{сл}})$ и оценки $\langle U_1 \rangle, \langle U_2 \rangle$.

$$\langle f_0_{\text{ссл}}(t_{\text{окр } r}) + f_0_{\text{сл}} \rangle = (f_{S2}(t_{\text{окр}}) \cdot R_{\text{э1}} - f_{S1}(t_{\text{окр}}) \cdot R_{\text{э2}}) / (R_{\text{э1}} - R_{\text{э2}}); \quad (5.9)$$

$$\langle U_1 \rangle = \langle I_{\text{дмп}} \rangle \cdot R_{\text{э1}} = R_{\text{э1}} \cdot (f_{S1} - f_{S2}) / [\langle K_{\text{фл } \delta} \rangle \cdot (R_{\text{э1}} - R_{\text{э2}})]; \quad (5.10)$$

$$\langle U_2 \rangle = \langle I_{\text{дмп}} \rangle \cdot R_{\text{э2}} = R_{\text{э2}} \cdot (f_{S1} - f_{S2}) / [\langle K_{\text{фл } \delta} \rangle \cdot (R_{\text{э1}} - R_{\text{э2}})]. \quad (5.11)$$

$$\text{Обычно в практике } R/R_{\text{вх}} \rightarrow 0, \text{ и } R_1 \approx R_{\text{э1}}, R_2 \approx R_{\text{э2}}. \quad (5.12)$$

Относительная погрешность данной замены, с учетом (4.2)

$$\delta R = (R - R_{\text{э}}) \cdot 100\% / R_{\text{э}} = R \cdot 100\% / R_{\text{вх}}. \quad (5.13)$$

Для исключения составляющей $f_0_{\text{сл}}$, операции измерения и подсчета оценок $f_0(t_{\text{окр } r}, f_0_{\text{сл}})$ проводим в нескольких включениях ПДНЧ. Из статистики (n включений) оценок $\langle f_0(t_{\text{окр } r}, f_0_{\text{сл } n}) \rangle = \langle f_0_{\text{ссл}}(t_{\text{окр } r}) + f_0_{\text{сл } n} \rangle$ находим среднее арифметическое, которое считаем равным оценке $\langle f_0_{\text{ссл}}(t_{\text{окр } r}) \rangle$.

Для оценки параметров K_f/K_{0f} , $f_{0п}$ и аналитической зависимости $f_0(t_{\text{окр}})$, необходимо найти (как указано ранее) оценки $\langle f_0_{\text{ссл}}(t_{\text{окр } r}) \rangle$ для двух значений температур ($t_{\text{окр1}}, t_{\text{окр2}}$). Эти значения должны находиться в интервале $t_{\text{окрв}}^{\text{гр+}} \dots t_{\text{окрн}}^{\text{гр-}}$ (см. рис. 3,б). Для повышения точности желательно, чтобы $t_{\text{окр1}}, t_{\text{окр2}}$ соответственно приближались к краям этого интервала. Необходимо также определить систематические значения выходной частоты ПДНЧ при его замкнутом входе ($f_{\text{кз ссл}}(t_{\text{окр } r})$) для $t_{\text{окр1}}, t_{\text{окр2}}$ (см. раздел 3). При этом в качестве малого сопротивления $R_{\text{мс}}$ возможно использование нагрузочного резистора R (например, R_1) по схеме рис. 5 с отключением источников питания УОС и гироблока

ГДУСК. Пусть получены следующие результаты : $\langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр1}}) \rangle$, $\langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр2}}) \rangle$, $f_{\text{кз сс}}(t_{\text{окр1}})$, $f_{\text{кз сс}}(t_{\text{окр2}})$. Из (4.24), с учетом (4.18) (вторая строка), составим систему уравнений:

$$f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр1}}) = (K_f/K_{0f}) \cdot f_{\text{кз сс}}(t_{\text{окр1}}) + f_{0\text{п}}; \quad f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр2}}) = (K_f/K_{0f}) \cdot f_{\text{кз сс}}(t_{\text{окр2}}) + f_{0\text{п}}.$$

Откуда находим оценки:

$$\langle K_f/K_{0f} \rangle = (\langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр1}}) \rangle - \langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр2}}) \rangle) / (f_{\text{кз сс}}(t_{\text{окр1}}) - f_{\text{кз сс}}(t_{\text{окр2}})); \quad (5.14)$$

$$\langle f_{0\text{п}} \rangle = (f_{\text{кз сс}}(t_{\text{окр1}}) \cdot \langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр2}}) \rangle - f_{\text{кз сс}}(t_{\text{окр2}}) \cdot \langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр1}}) \rangle) / (f_{\text{кз сс}}(t_{\text{окр1}}) - f_{\text{кз сс}}(t_{\text{окр2}})). \quad (5.15)$$

15)

Оценим параметры функции $f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр}})$, составляя систему уравнений с учетом (4.25):

$$f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр1}}) = f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр}} = 0) + C_{f0T} \cdot t_{\text{окр1}}; \quad f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр2}}) = f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр}} = 0) + C_{f0T} \cdot t_{\text{окр2}}.$$

Откуда следуют оценки.

$$\langle C_{f0T} \rangle = (\langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр1}}) \rangle - \langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр2}}) \rangle) / (t_{\text{окр1}} - t_{\text{окр2}}); \quad (5.16)$$

$$\langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр}} = 0) \rangle = (\langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр2}}) \rangle \cdot t_{\text{окр1}} - \langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр1}}) \rangle \cdot t_{\text{окр2}}) / (t_{\text{окр1}} - t_{\text{окр2}}). \quad (5.17)$$

В результате записываем оценку аналитической зависимости $f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр}})$:

$$\langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр}}) \rangle = \langle C_{f0T} \rangle \cdot t_{\text{окр}} + \langle f_{0\text{ сс}}(t_{\text{окр}} = 0) \rangle. \quad (5.18)$$

6. Пример

При работе 1-го ПДНЧ, указанного в разделе 3, совместно с ГДУСК-ДНГ, был обеспечен съём выходной информации ПДНЧ и подсчёт технологической аппаратурой числа N_S импульсов за время $S=60\text{с}$. Согласно ТУ на ПДНЧ: $R_{\text{вх}}=60\text{ кОм}$; $K_f=10\text{ Гц/мВ}\pm 0,2\%$;

$$\left| f_{\text{кз изм}} \right|_{\text{max}} = 10\text{ Гц}.$$

а) Результаты измерений одного включения ПДНЧ, в одном запуске ротора гироблока ГДУСК, $N_{S1}(20^\circ\text{C})=-425\text{ имп}$ (при $M1$, $R=R_1=37\text{ Ом}$, $U_{M1}=87,5\text{ мВ}$); $N_{S2}(20^\circ\text{C})=-280\text{ имп}$ (при $M2$, $R=R_2=17\text{ Ом}$, $U_{M2}=150\text{ мВ}$).

Оценить параметры линеаризации $K_{\text{фл ср}}$, $f_0(20^\circ\text{C})$ и измеренные значения U_1, U_2 .

Решение. Считая, что максимально допустимое значение ($f_{0д}$) параметров f_0^+ , f_0^- определяется как $f_{0д} = \left| f_{кз \text{ изм}} \right|_{\max} = 10 \text{ Гц}$, найдем оценку коэффициента $K_{\text{фл } \delta}$ из (5.6) и оценку (5.7) относительной ошибки отличия $K_{\text{фл1}}$ от $K_{\text{фл2}}$.

Из (5.2) для M1 и M2
 $K_{\text{фл1 ср}} = 10 + 10 / (\pi \cdot 87.5) = 10,0364 \text{ Гц/мВ}$; $K_{\text{фл2 ср}} = 10 + 10 / (\pi \cdot 150) = 10,0212 \text{ Гц/мВ}$;
 $\langle K_{\text{фл } \delta} \rangle = 0,5 \cdot (10,0364 + 10,0212) = 10,029$; $\langle \delta K_{\text{фл } \delta} \rangle = 100\% \cdot |10,0364 - 10,0212| / 10,029 \approx 0,15\%$.

Поскольку $\langle \delta K_{\text{фл } \delta} \rangle$ – мала и меньше модуля погрешности K_f (по ТУ 0,2%), продолжим расчет.

Значения средней частоты из (4.3)

$$f_{S1}(20^\circ\text{C}) = -425/60 = -7,08 \text{ Гц}; f_{S2}(20^\circ\text{C}) = -280/60 = -4,67 \text{ Гц}.$$

Анализируем замену (5.12). Наибольшая относительная погрешность этой замены из (5.13) равна

$$\delta R = 37 \cdot 100\% / 60000 \approx 0,06\%. \text{ Данной ошибкой пренебрегаем и находим оценки (5.9)-(5.11):}$$

$$\langle f_0(20^\circ\text{C}, f_{0 \text{ сл}}) \rangle = (-4,67 \cdot 37 - (-7,08) \cdot 17) / (37 - 17) = -2,61 \text{ Гц};$$

$$\langle U_1 \rangle = 37 \cdot [(-7,08) - (-4,67)] / [10,03 \cdot (37 - 17)] = -0,445 \text{ мВ};$$

$$\langle U_1 \rangle = 17 \cdot [(-7,08) - (-4,67)] / [10,03 \cdot (37 - 17)] = -0,205 \text{ мВ};$$

б) Дополнительно после обработки статистики измерений и расчетов (аналогичных п.

а)) при $t_{\text{окр1}} = -55^\circ\text{C}$, $t_{\text{окр2}} = 60^\circ\text{C}$ (входящих в интервал $t_{\text{окрв}}^{\text{гр+}} \dots t_{\text{окрн}}^{\text{гр-}}$, см. раздел 3) получено: $\langle f_0 \text{ сс}(-55^\circ\text{C}) \rangle = -2,10 \text{ Гц}$, $\langle f_0 \text{ сс}(60^\circ\text{C}) \rangle = -3,45 \text{ Гц}$, а также при $R_{\text{мс}} = R_1$, $f_{\text{кз изм сс}}(-55^\circ\text{C}) = 1,65 \text{ Гц}$, $f_{\text{кз изм сс}}(60^\circ\text{C}) = -2,55 \text{ Гц}$, причем $\sigma(f_{\text{кз изм сл}}) = 0,2 \text{ Гц}$. Оценить параметры нулевой зоны ПДНЧ (в том числе $K_{\text{фл1}}$, $f_0 \text{ сс}(t_{\text{окр}})$, среднеквадратическое отклонение $\sigma(f_0 \text{ сл})$).

Решение. Модуль относительной ошибки от неполноценного закорачивания $\left| \delta_{f \text{ кз}} \right|$ из (3.11)

$$\left| \delta_{f \text{ кз}} \right| = 37 \cdot 100\% / (60000 + 37) \approx 0,006\%.$$

Ошибкой $\left| \delta_{f_{кз}} \right|$ пренебрегаем и считаем $f_{кз\text{ сс}} = f_{кз\text{ изм сс}}$, $f_{кз\text{ сл}} = f_{кз\text{ изм сл}}$. Из

(5.14)...(5.17):

$$\langle K_f / K_{0f} \rangle = (-2,10 - (-3,45)) / (1,65 - (-2,55)) = 0,321;$$

$$\langle f_{0п} \rangle = (1,65 \cdot (-3,45) - (-2,55) \cdot (-2,10)) / (1,65 - (-2,55)) = -2,63 \text{ Гц};$$

$$\langle C_{f0T} \rangle = (-2,10 - (-3,45)) / (-55 - 60) = -0,0174 \text{ Гц/град. С};$$

$$\langle f_{0\text{ сс}}(t_{окр} = 0) \rangle = (-3,45 \cdot (-55) - (-2,10) \cdot 60) / (-55 - 60) = -2,74 \text{ Гц}.$$

Откуда следуют оценки составляющих f_0 – систематики (5.18) и среднеквадратического отклонения $\sigma(f_{0\text{ сл}})$ случайной составляющей ((4.19) вторая строка, с учетом (4.20),(4.23)):

$$\langle f_{0\text{ сс}}(t_{окр}) \rangle = -0,0174 \cdot t_{окр} - 2,74 \text{ Гц};$$

$$\langle \sigma(f_{0\text{ сл}}) \rangle = \sigma(f_{кз\text{ изм сл}}) \cdot \langle K_f / K_{0f} \rangle = 0,2 \cdot 0,321 = 0,064 \text{ Гц}.$$

Оценки $K_{fл1}$ из (5.2), (5.4) и $\delta K_{fл1}$ (5.3), (5.5), учитывая (4.9) и полученную оценку

$\langle f_{0п} \rangle$:

$$\langle K_{fл1} \rangle = K_{fл1\text{ ср}} = 10,0364 \text{ Гц/мВ}; \quad \langle \delta K_{fл1} \rangle = 100\% \cdot (10 - 2 \cdot |-2,63|) / (\pi \cdot 87,5 \cdot 10,0364) \approx 0,17\%.$$

Поскольку $\langle \delta K_{fл1} \rangle$ – больше нуля, мала и меньше модуля погрешности K_f (0,2%), то оценка $\langle K_{fл1} \rangle$ – обоснована. Используя значение K_f по ТУ, находим $\langle K_{0f} \rangle = 10 / 0,321 = 31,1$ Гц/мВ. Крайние значения $E_{сс}$ и $f_{0T\text{ сс}}$ (соответственно вторые строки (3.10), (4.18)):

$$\langle E_{сс}(-55^\circ\text{C}) \rangle = 1,65 / 31,1 = 0,053 \text{ мВ}; \quad \langle E_{сс}(60^\circ\text{C}) \rangle = -2,55 / 31,1 = -0,082 \text{ мВ};$$

$$\langle f_{0T\text{ сс}}(-55^\circ\text{C}) \rangle = 0,321 \cdot 1,65 = 0,53 \text{ Гц}; \quad \langle f_{0T\text{ сс}}(60^\circ\text{C}) \rangle = 0,321 \cdot (-2,55) = -0,82 \text{ Гц}.$$

Таким образом, начальные значения $f_{0\text{ сс}}(t_{окр})$ (4.24) для промежуточных температур находятся в интервале между следующими пределами (верхним и нижним):

$$f_{0\text{ ссв}} = \langle f_{0п} \rangle + \langle f_{0T\text{ сс}}(-55^\circ\text{C}) \rangle = -2,63 + 0,53 = -2,10 \text{ Гц};$$

$$f_{0\text{ ссн}} = \langle f_{0п} \rangle + \langle f_{0T\text{ сс}}(60^\circ\text{C}) \rangle = -2,63 + (-0,82) = -3,45 \text{ Гц}.$$

Максимальный модуль возможных граничных значений входных напряжений.

$$U_{гр\text{ max}} = f_{0д} / (K_{0f} - K_f) = 10 / (31,1 - 10) = 0,47 \text{ мВ}.$$

Отношения $|\langle U \rangle| \cdot 100\% / U_M$, $|E_{сс}|_{\text{max}} \cdot 100\% / U_M$, $U_{гр\text{ max}} \cdot 100\% / U_M$ для режимов М1 и М2:

$$|-0,445| \cdot 100\% / 87,5 = 0,509\%, \quad |-0,205| \cdot 100\% / 150 = 0,137\%;$$

$$|-0,082| \cdot 100\% / 87,5 = 0,094\%, \quad |-0,082| \cdot 100\% / 150 = 0,055\%;$$

$$0,47 \cdot 100\% / 87,5 = 0,54\%, \quad 0,47 \cdot 100\% / 150 = 0,32\% .$$

Рассмотренные максимальные отношения составляют менее 0,6%, то есть подтверждается практическое условие (4.4) и допускается выполнение приближенных вычислений.

7. Выводы

1. Математическая модель «идеального» (в смысле стабильности выходной информации) преобразователя двухполярного напряжения в частоту (ИПДНЧ) выражает зависимость выходной частоты от входного напряжения в виде графика, представляющего собой ломаную линию (с коэффициентами преобразования K_f , K_{0f} , K_f).
2. Осуществлен переход от модели ИПДНЧ к модели реального ПДНЧ, включающей ИПДНЧ и источник ЭДС (E). Эта ЭДС содержит случайную (проявляющуюся при повторном включении преобразователя) и систематическую (зависящую от температуры ($t_{окр}$) воздуха, окружающего электроэлементы ПДНЧ) составляющие. Выходная частота ПДНЧ, при его закороченном входе ($f_{кз}$), зависит от указанной ЭДС и соответственно имеет случайную ($f_{кз\ сл}$) и систематическую ($f_{кз\ сс}(t_{окр})$) составляющие.
3. Рассмотрены зависимости выходной частоты ПДНЧ при работе на малых сигналах и содержании в его входном напряжении полезной постоянной (U) и переменной ($u_{пер}(t)$) (фоновой синусоидальной), создающей помеху, составляющих. Получена линеаризованная функция математического ожидания (МО) средней выходной частоты ПДНЧ от составляющей U ($m_f(U)$). Начальное значение этой функции ($m_f(U=0)$), обозначенное f_0 , содержит составляющую ($f_{0Т}$), пропорциональную E , и составляющую ($f_{0П}$), обусловленную наличием $u_{пер}(t)$ и зависящую от уровня начальных постоянных смещений выходной частоты (f_0^+ , $-f_0^-$) ПДНЧ. Аналогично п.2, значение f_0 имеет случайную ($f_{0\ сл}$) и систематическую ($f_{0\ сс}$ – линейно зависящую от температуры $t_{окр}$ с коэффициентом влияния $C_{f0Т}$) составляющие.
4. Предложены методы и формулы для оценки параметров нулевой зоны ПДНЧ (K_f/K_{0f} , $K_{фл}$, $f_{кз}$, $f_{0\ сс}$, $f_{0\ сл}$, $f_{0П}$, $C_{f0Т}$, E), при работе последнего совместно с гироскопическим датчиком угловой скорости компенсационного типа (ГДУСК), допускающим возможность измерений (по команде оператора) в режимах с масштабами М1 или М2.
5. Показан пример нахождения оценок параметров нулевой зоны ПДНЧ.

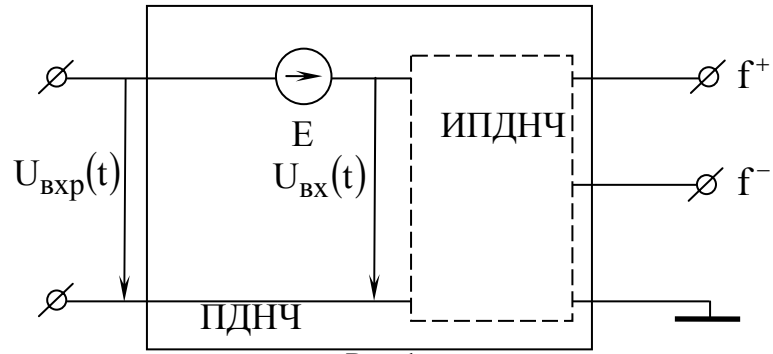


Рис.1

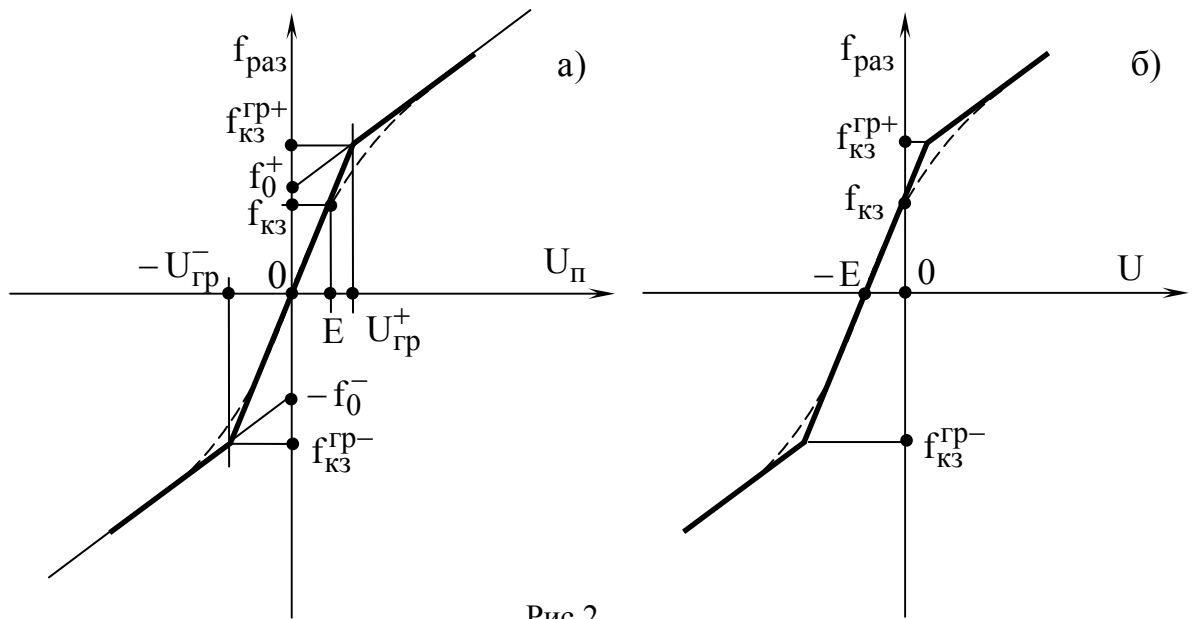


Рис.2

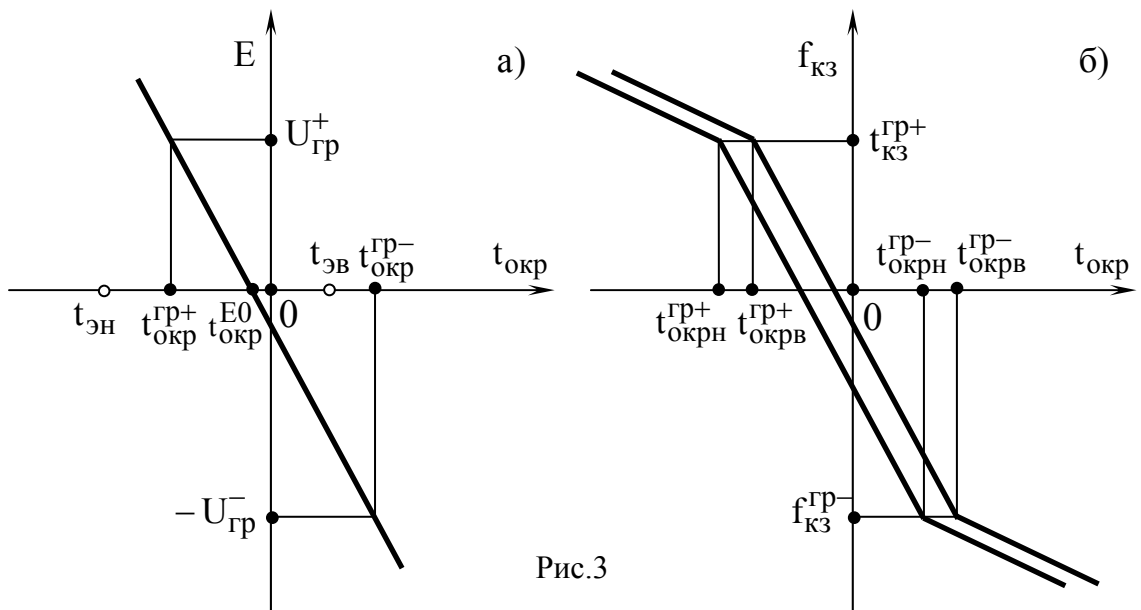


Рис.3

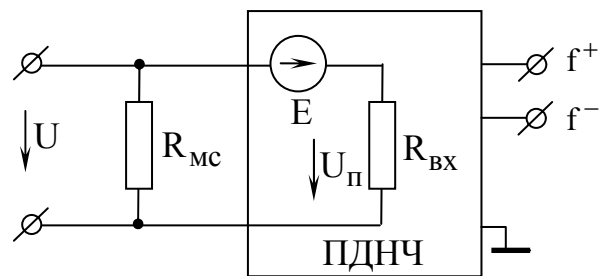


Рис.4

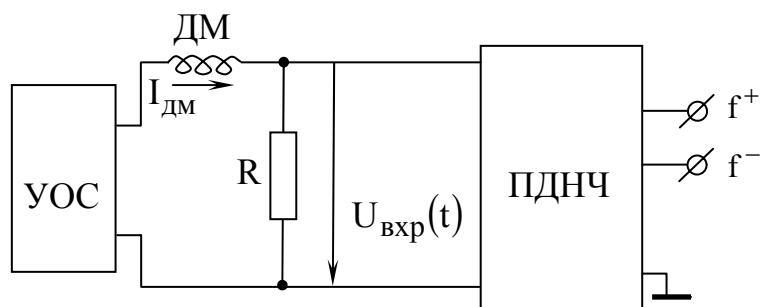


Рис.5

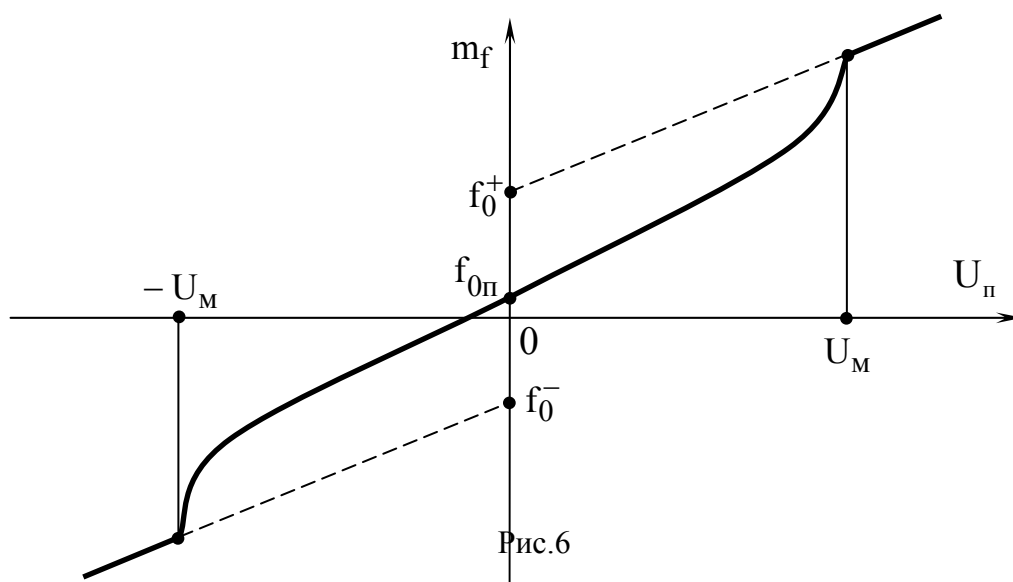


Рис.6

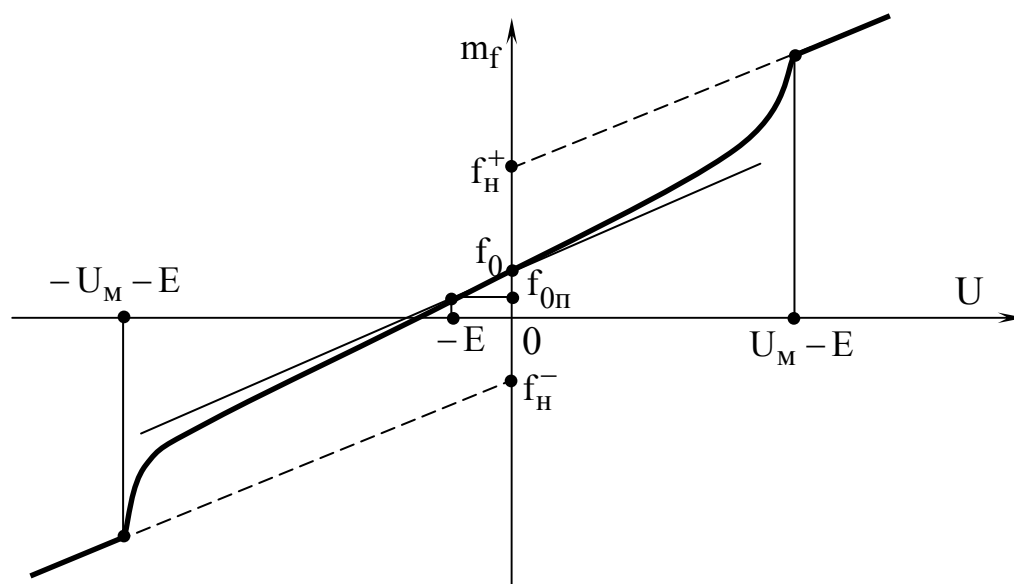


Рис.7

Библиографический список

1. Гутников В.С.. Интегральная электроника в измерительных устройствах.- 2-е изд.- Л.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Воросколевский В.И., Пинигин Н.Я.. Преобразователи напряжения в частоту и их применение в технике измерений и управления.- М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Микросхемы интегральные К1468БК2У-02 Технические условия АДБК431260.904-02ТУ, 2003.
4. Пельпор Д.С. и др. Гироскопические приборы и системы. М.: Высш. шк., 1988.
5. Пельпор Д.С. и др. Динамически настраиваемые гироскопы: Теория и конструкция. М.: Машиностроение, 1988.
6. Захаров А.А. Математическая модель преобразователя двухполярного напряжения в частоту, его вероятностная информация при работе на малых напряжениях в условиях фоновой помехи.
7. Алексенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И.. Применение прецизионных аналоговых ИС. М.: Радио и связь, 1981.
8. Куликовский К.Р., Купер В.Я.. Методы и средства измерений. М.: Энергоатомиздат, 1986.

9. Вентцель Е.С.. Теория вероятностей. Учеб. для вузов. - 5-е изд. стер. - М.: Высш. шк., 1998.

Сведения об авторе

Захаров Александр Александрович, ведущий инженер ФГУП ГосНИИП,
129226, Москва, проспект Мира, 125, телетайп 112654, телеграф «Корунд»,
e-mail:corund@col.ru