

## ФАЗО-ИМПУЛЬСНЫЕ ДЕМОДУЛЯТОРЫ ВРЕМЯ-ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ

*В. И. Коржов, А. М. Горбань, Т. А. Зимовец*

К и е в

В системах измерения и контроля широко применяется время-импульсное преобразование контролируемой величины, при котором квантованная по времени контролируемая величина в виде последовательности отсчетных импульсов воздействует на непрерывную систему [1].

В усилительно-преобразовательном тракте системы импульсная последовательность подвергается фазо-импульсной демодуляции. Фазо-импульсные демодуляторы (ФИД) являются анализаторами временного рассогласования отсчетных импульсов, преобразующими временной интервал между импульсами в команды управления с учетом порядка следования (фазы) парной импульсной посылки.

ФИД в зависимости от вида и статистических характеристик можно отнести к одной из трех групп:

а) с релейной характеристикой (рис. 1, тип А)

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \varepsilon_0 \operatorname{sign} t & \text{при } t \geq t_0; \\ 0 & \text{при } t < t_0; \end{cases}$$

б) с пропорциональной характеристикой (рис. 1, тип Б)

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 t;$$

в) с поразрядной характеристикой (рис. 1, тип В)

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} r^n \varepsilon_0 \operatorname{sign} t & \text{при } t \geq t_0; \\ n = 0, 1, 2, \dots, N; & \text{при } t < t_0. \\ 0; & \end{cases}$$

Характеристики типа А и В являются нелинейными при любых рассогласованиях  $t$ ; характеристику типа Б при больших временных рассогласованиях можно рассматривать как линейную, а при малых — как нелинейную. В связи с этим системы с ФИД типа Б, В имеют существенные различия в работе лишь при больших временных рассогласованиях, т. е. в режиме переходного процесса, а в установившемся режиме, при малых рассогласованиях, их можно считать равноценными.

В зависимости от характера переменного выходного параметра ФИД  $\varepsilon(t)$  последние разделяются на амплитудные и временные. Временные ФИД, в свою очередь, включают в себя фазовые и частотные.

В амплитудных ФИД значение входного параметра изменяется скачкообразно в дискретные моменты времени, при этом восстановление информации в ФИД типа А должно сопровождаться

запоминанием сигнала в паузах между импульсными посылками, откуда следует, что они должны содержать преобразующее звено с двумя входами, запоминающее звено с одним или двумя входами и запоминающее звено с одним или двумя выходами (рис. 2).

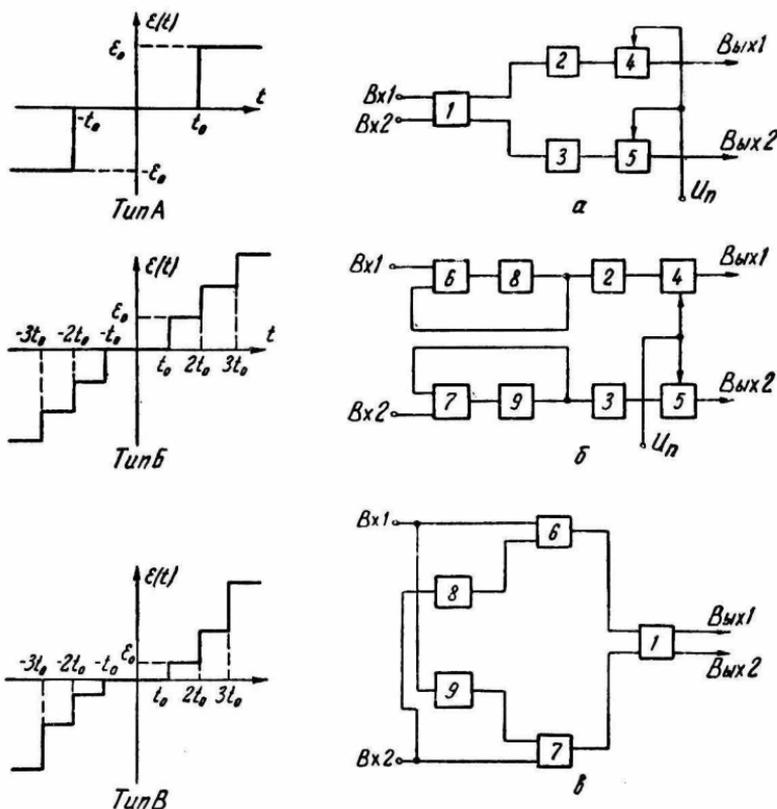


Рис. 1. Фазо-импульсные демодуляторы:

тип А — ФИД с релейной характеристикой; тип Б — ФИД с пропорциональной характеристикой; тип В — ФИД с поразрядной характеристикой.

Рис. 2. Структурные схемы амплитудных ФИД:

а — амплитудный ФИД с триггером в качестве преобразующего звена; б — амплитудный ФИД с двумя одновибраторами в качестве преобразующего звена; в — амплитудный ФИД с ограничительными звеньями (1 — триггер; 2, 3 — фильтр; 4, 5 — предварительный усилитель; 6, 7 — схема совпадения; 8, 9 — ждущий мультивибратор).

В качестве преобразующего звена может быть использован, например, триггер 1 (рис. 2, а), запускаемый по отдельным входом отсчетными импульсами, или два одновибратора 8, 9 (рис. 2, б), управляющие работой друг друга. Длительности выходных импульсов одновибраторов 8, 9 выбираются по величине больше, чем значение максимального временного сдвига между отсчетными импульсами.

При совпадении во времени отсчетных импульсов работа таких звеньев становится неоднозначной, так как триггер 1 (рис. 2, а) запускается при этом по счетному входу, а одновибраторы 8, 9 (рис. 2, б) приводятся во временно устойчивое состояние одновременно, что приводит к автоколебательному режиму работы. Поэтому в релейные ФИД вводятся ограничительные звенья — схемы временного совпадения 6, 7 (рис. 2, в), запрещающие работу ФИД при уменьшении значения временного сдвига между импульсами до величины, определяемой зоной нечувствительности ФИД (рис. 2, в).

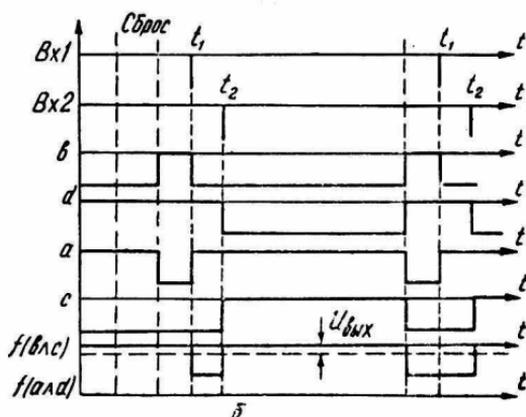
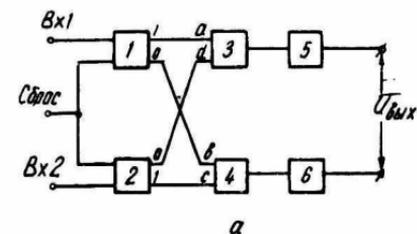


Рис. 3. Функциональная схема — амплитудный ФИД с двумя триггерами в качестве элементов, формирующих временной интервал а:

1, 2 — триггер; 3, 4 — схема совпадения; 5, 6 — фильтр низкой частоты. Эпюры, характеризующие работу амплитудного ФИД (б).

ФИД типа Б обеспечивают выдачу информации не только о знаке временного рассогласования, но и о его величине. ФИД типа Б обычно выполняются с многоступенчатым преобразователем. Временной интервал между отсчетными импульсами в первую очередь преобразуется в широто-модулированный импульс, а затем в пульсирующее напряжение, среднее значение которого пропорционально величине рассогласования. При этом реализуется преобразование вида фаза-время-амплитуда.

На рис. 3 приведены функциональная схема и эпюры, характеризующие работу амплитудного ФИД, где в качестве элементов, формирующих переменный временной интервал, используются два триггера. Для работы такого ФИД необходимо формирование импульсов сброса, предназначенных для установления триггеров схемы в исходное состояние. При поступлении первого отсчетного импульса на вход 1 срабатывает триггер 1 (рис. 3, а), при этом происходит совпадение на схеме 4. При поступлении второго отсчетного импульса на вход 2 срабатывает триггер 2. Нарушается совпадение на схеме 4, а потенциалы на выходах триггеров 1, 2 имеют значения, противоположные исходным.

Таким образом, на выходе схемы 4 формируется импульс,

длительность которого равна временному сдвигу между отсчетными импульсами. При смене их фазы следования происходит совпадение на схеме 3, а ФИД работают аналогично первому случаю. На рис. 4, а представлена схема ФИД, не требующего импульсов сброса. Вместо триггеров в схеме использованы одновибраторы 1 и 2, и схема автоматически устанавливается в исход-

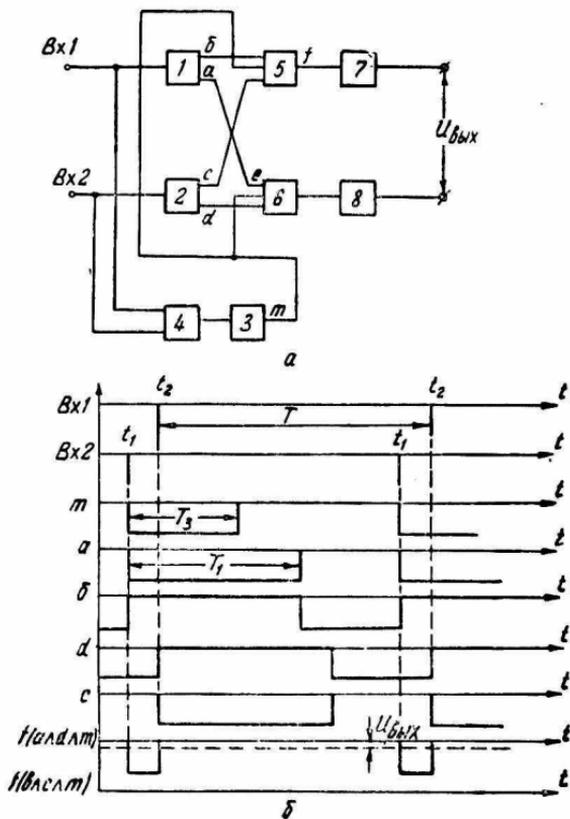


Рис. 4. Амплитудный ФИД, не требующий импульсов сброса (а):

1, 2, 3 — ждущий мультивибратор; 4 — схема «ИЛИ»; 5, 6 — схема совпадения; 7, 8 — фильтр низкой частоты. Эпюры, характеризующие работу ФИД (б).

ное состояние. Одновибратор 3 необходим для исключения влияния на работу ФИД неравенства номинальных значений длительностей импульсов одновибраторов 1 и 2. Среднее значение импульсной последовательности на выходах преобразующего звена выделяется фильтрами низкой частоты ФНЧ (рис. 4, а).

Для нормальной работы устройства амплитуда пульсации выходного напряжения не должна превышать заданной величины. Поскольку ФНЧ наиболее слабо подавляют первую гармонику, его

параметры рассчитывают исходя из ослабления этой гармоники на заданную величину. Значение первой гармоники определяется по формуле

$$U_1 = \frac{2U_m}{\pi} \sin \pi\gamma, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — скважность входного сигнала ФИД;

$U_m$  — амплитудное значение напряжения на выходе ФНЧ.

Как следует из (1), максимальную амплитуду первая гармоника имеет при  $\gamma = 0,5$ , т. е. при  $t_p = \frac{T}{2}$ . Обычно в системах

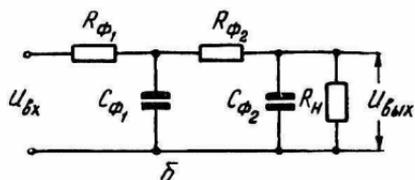
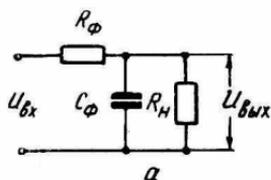


Рис. 5. Фильтры низкой частоты:

*a* — однозвенный фильтр низкой частоты; *б* — многозвенный фильтр низкой частоты.

Рассмотрим первый режим работы. Поскольку частота входных импульсов в этом режиме не меняется, остается неизменной при изменении  $\gamma$  и частота первой гармоники. Напряжение на выходе ФНЧ (рис. 5, *a*)

$$U_{1m} = \frac{U_{вх\ 1m}}{R_\phi + \frac{1}{R_H + \frac{1}{\omega C}}}. \quad \frac{1}{\omega C}$$

При выполнении неравенств

$$\frac{1}{\omega C_\phi} \ll R_\phi; \quad \frac{1}{\omega C_\phi} \ll R_H,$$

где  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$  — угловая частота первой гармоники, равная частоте входных импульсов, можно записать

$$U_{1m} \approx \frac{U_{вх\ 1m}}{R_\phi} \frac{1}{\omega C_\phi}. \quad (2)$$

с время-импульсным развертыванием  $\gamma \ll 0,5$ , поэтому расчет фильтра ведется для максимально возможной скважности.

Для расчета сглаживающего фильтра необходимо учесть два характерных режима ФИД. В первом режиме, являющемся определяющим, скважность импульсов на входе ФИД изменяется вследствие изменения контролируемого параметра. Во втором режиме скважность изменяется вследствие изменения частоты, обусловленной нестабильностью скорости развертывающего преобразования.

Из выражения (2) найдем постоянную времени фильтра:

$$\tau_{\Phi} = R_{\Phi} C_{\Phi} = \frac{U_{\text{вх}1m}}{U_{\text{вых}1m} \omega} = \frac{2U_m \sin \pi \gamma_{\text{max}}}{\pi U_{\text{вых}1m} \omega} = \frac{k_c}{\omega}, \quad (3)$$

где  $k_c = \frac{U_{\text{вх}1m}}{U_{\text{вых}1m}}$  — коэффициент сглаживания фильтра.

Так как коэффициент сглаживания  $k_c$  должен быть достаточно велик, постоянная времени однозвенного фильтра и, следовательно, инерционность ФИД также велика. Существенного уменьшения инерционности можно достигнуть, применяя многозвенные фильтры (рис. 5, б).

Для двухзвенного фильтра, у которого

$$\frac{1}{\omega C_{\Phi_1}} \ll R_{\Phi_1}; \quad \frac{1}{\omega L_{\Phi_1}} \ll R_{\Phi_1};$$

$$\frac{1}{\omega C_{\Phi_2}} \ll R_{\Phi_2}; \quad \frac{1}{\omega L_{\Phi_2}} \ll R_{\Phi_2},$$

имеем

$$U_{\text{вых}1m} \approx \frac{U_{1m}}{\omega R_{\Phi_2} C_{\Phi_2}} = \frac{U_{\text{вх}1m}}{\omega^2 R_{\Phi_1} C_{\Phi_1} R_{\Phi_2} C_{\Phi_2}} = \frac{U_{\text{вх}1m}}{\omega^2 \tau_{\Phi_1} \tau_{\Phi_2}}. \quad (4)$$

При  $\tau_{\Phi_1} = \tau_{\Phi_2} = \tau_{\Phi}$  получим

$$\tau_{\Phi_1} \tau_{\Phi_2} = \frac{2U_m \sin \pi \gamma_{\text{max}}}{\pi U_{\text{вых}1m} \omega^2} = \frac{K_c}{\omega^2}.$$

Отсюда

$$\tau_{\Phi} = \frac{\sqrt{K_c}}{\omega}. \quad (5)$$

Сравнивая (3) и (5), видим, что инерционность фильтра уменьшается с увеличением числа его звеньев.

Рассмотрим второй режим работы ФИД при переменной частоте  $f$  входных импульсов и постоянной  $\gamma$ . Для однозвенного ФНЧ амплитуда 1-й гармоники на выходе фильтра

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{U_{\text{вх}1}}{\omega R_{\Phi} C_{\Phi}} = \frac{2U_m \sin \pi \frac{t_p}{T}}{\pi \omega R_{\Phi} C_{\Phi}} = \frac{U_m t_p \sin \frac{\omega t_p}{2}}{\pi R_{\Phi} C_{\Phi} \left( \frac{1}{2} \omega t_p \right)}.$$

Наибольшего значения амплитуда первой гармоники, а следовательно, и амплитуда пульсаций на выходе ФНЧ достигает при наименьшей возможной частоте  $\omega = \omega_{\text{min}}$ , тогда

$$\tau_{\Phi} = \frac{U_m t_p \sin \frac{1}{2} \omega_{\text{min}} t_p}{U_{\text{вых}1m} \left( \frac{1}{2} \omega_{\text{min}} t_p \right)}.$$

При  $\frac{1}{2} \omega_{\min} t_p$  — малой величине

$$\begin{aligned} \sin \frac{1}{2} \omega_{\min} t_p &= \frac{1}{2} \omega_{\min} t_p, \\ \tau_{\Phi} &= \frac{U_m t_p}{U_{\text{вых1m}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для двухзвенного фильтра при сделанных выше допущениях имеем

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{U_{\text{вх1}}}{\omega^2 \tau_{\Phi_1} \tau_{\Phi_2}} = \frac{U_m t_p^2 \sin \frac{1}{2} \omega t_p}{2\pi \left( \frac{1}{2} \omega t_p \right)^2 \tau_{\Phi_1} \tau_{\Phi_2}}.$$

Амплитуда пульсаций на выходе ФНЧ достигает наибольшего значения при минимальной частоте, тогда

$$\tau_{\Phi_1} \tau_{\Phi_2} = \frac{U_m t_p^2 \sin \omega_{\min} t_p}{2\pi U_{\text{вых1m}} \left( \frac{1}{2} \omega_{\min} t_p \right)^2}.$$

Учитывая (4), (6), получаем

$$\tau_{\Phi} = \sqrt{\frac{U_m t_p}{\omega_{\min} U_{\text{вых1m}}}}.$$

С учетом двух режимов работы выражение для постоянной времени фильтра  $\tau = \tau_{\Phi_1} \tau_{\Phi_2}$  найдем из выражения (5):

$$\tau = \tau_{\Phi_1} \tau_{\Phi_2} = \frac{T_{\min}^2 U_m \sin \frac{t_p \max}{T_{\min}}}{2\pi^3 U_{\text{вых1m}}}.$$

При  $\tau_{\Phi_1} = \tau_{\Phi_2} = \tau_{\Phi}$  окончательно имеем

$$\tau_{\Phi} = \frac{T_{\min}}{2\pi} \sqrt{\frac{U_m \sin \pi \gamma_{\max}}{2\pi U_{\text{вх1}}}}.$$

Абсолютное значение амплитуды пульсаций не всегда является основным показателем, характеризующим работу системы. Важными параметрами являются относительные характеристики процесса установления выходного напряжения.

Для получения максимального быстродействия ФИД желательно иметь широкую полосу частот ФНЧ, но при этом сказывается составляющая частот дискретизация, т. е. пульсация на выходе ФНЧ увеличивается. Это приводит к необходимости выбора параметров выходных цепей ФНЧ таким образом, чтобы при заданной частоте следования отсчетных импульсов  $f = \frac{1}{T}$  время установления переходного процесса  $\tau_y$  и величина пульсаций на выходе фильтра ФНЧ были минимальными.

Для оценки пульсаций выходного параметра ФИД удобной характеристикой является относительная величина  $\delta_\Phi$ , равная

$$\delta_\Phi = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}}, \quad (7)$$

где  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  — максимальное и минимальное значения пульсирующего напряжения на выходе ФНЧ, установившиеся после окончания переходного процесса и определяемые в соответствии с [2] по формулам

$$U_{\max} = kU_0 \frac{1 - e^{-\sigma_{\min} \tau}}{1 - e^{-\sigma_3}};$$

$$U_{\min} = kU_0 \frac{(1 - e^{-\sigma_{\min} \tau}) e^{-\sigma_{\max} (1-\gamma)}}{1 - e^{-\sigma_3}}.$$

Здесь

$$\sigma_3 = \sigma_{\min} \gamma + \sigma_{\max} (1 - \gamma);$$

$U_0$  — высота импульсов, воздействующих на систему;

$k$  — коэффициент пропорциональности;

$\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  — корни полинома, входящего в знаменатель операторного коэффициента передачи непрерывной части ФИД.

Подставляя значения  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  в (7), получаем

$$\delta_\Phi = 1 - e^{-\sigma_{\max} (1-\gamma)}. \quad (8)$$

Постоянную времени разрядной цепи фильтра с учетом погрешности установления  $\delta_y$  определяем следующим образом:

$$\delta_y = \frac{U_{\max} [\infty, \varepsilon] - U_{\max} [n_y, \varepsilon]}{U_{\max} [\infty, \varepsilon]},$$

где  $n_y$  — целое число тактов дискретизации;

$\varepsilon$  — относительная величина  $0 < \varepsilon < 1$ , при этом  $n_y + \varepsilon = \frac{t}{T} = \tau$ .

Подставляя  $U_{\max} [\infty, \varepsilon]$ ,  $U_{\max} [n_y, \varepsilon]$  из [2], найдем

$$\delta_y = e^{-\sigma_{\min} (n_y + 1)}. \quad (9)$$

При этом выходные звенья ФИД рассматриваем как непрерывную часть импульсной цепи. При рассмотрении ограничимся схемами без обратных связей. Полюсы операторных переходных коэффициентов таких систем всегда имеют отрицательную вещественную часть, а система устойчива.

Для получения  $n_y$  и  $\delta_\Phi$  заданными необходимо, чтобы все значения системы подчинялись неравенству

$$\sigma_{\min} < \sigma < \sigma_{\max}, \quad (10)$$

которые для  $RC$ - и  $RL$ -фильтров определяются как

$$\sigma = \frac{T}{\theta},$$

где  $\theta = RC$ , или  $\theta = \frac{L}{R}$ .

Решая уравнения (8), (9) относительно  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  и подставляя полученные выражения в (10), имеем

$$\frac{1}{n_y + 1} \ln \frac{1}{\delta_y} < \frac{T}{\theta} < \frac{1}{1 - \gamma} \ln \frac{1}{1 - \delta_\Phi}. \quad (11)$$

Выражения (8), (11) позволяют выбрать постоянную времени разрядной цепи фильтра при заданных коэффициентах успокоения.

Чувствительность или крутизна статической характеристики

ФИД с пропорциональной

характеристикой может

быть увеличена в два раза

при построении ФИД по

схеме, представленной на

рис. 6. Построенный по

этой схеме ФИД состоит

из триггера 1, запускае-

мого по отдельным им-

пульсами, двух ФНЧ-2 и 3,

релейного ФИД 4, сумматора

5 и временного ограни-

чителя 6, управляющего ра-

ботой сумматора. Времен-

ный ограничитель 6 разрешает

прохождение управляющего на-

пряжения на выход ФИД при

временном сдвиге входных сиг-

налов, большем, чем зона не-

чувствительности системы.

Релейный демодулятор 4 представляет собой устройство с двумя устойчивыми состояниями, которые определяются фазой входного сигнала. Выходные потенциалы с релейного демодулятора 4 управляют режимом работы сумматора 5, который выполняет операцию алгебраического сложения трех слагаемых, равных

$$U_1 = \begin{cases} U_m \gamma; \\ U_m (1 - \gamma); \end{cases} \quad U_2 = \begin{cases} U_0 (1 - \gamma) & \text{при } t_2 > t_1; \\ U_0 \gamma & \text{при } t_2 < t_1; \end{cases} \\ U_3 = U_m;$$

где  $U_1$ ,  $U_2$  — напряжения на выходе ФНЧ.

При этом напряжение на выходе сумматора

$$U_{\text{вых}} = U_1 - U_2 \pm U_3. \quad (12)$$

Подставляя в (12) значения слагаемых  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ , получаем

$$U_{\text{вых}} = \pm 2\gamma U_m = \pm 2U_m \frac{t_2 - t_1}{T}.$$

Знак слагаемого  $\pm U_3$  определяется релейным демодулятором. Характеристика такого ФИД имеет вид пропорциональной нелинейной характеристики с зоной нечувствительности  $t_0$ , определяемой временным ограничителем.

Амплитудные ФИД со сглаживающими фильтрами обладают высокой чувствительностью. При появлении на входе такого ФИД ложного импульса и случайном пропадании одного отсчетного импульса при достаточной величине постоянной времени фильтра среднее напряжение на его выходе не успевает существенно изменяться.

## ВЫВОДЫ

В результате исследований, приведенных выше, была произведена классификация фазо-импульсных демодуляторов (ФИД), используемых для измерения временного интервала между двумя отсчетными импульсами в зависимости от вида статических характеристик ФИД и от характера выходного параметра демодулятора. Построены структурные схемы амплитудных ФИД с использованием в качестве преобразующих элементов триггера и одновибраторов. Приведена схема ФИД с повышенной чувствительностью статической характеристики.

В результате анализа работы фильтров низкой частоты, используемых в ФИД, были выведены расчетные формулы, позволяющие построить оптимальный фильтр с требуемыми характеристиками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Коржов, А. В. Новиков, Ю. Ф. Сульженко, А. И. Бирulin. Схемы фотозлектрических устройств для фиксации положения и смещения двух изображений. Сб. «Радиотехника», вып. 8. Изд-во ХГУ, 1968.
2. Я. З. Цыпкин. Теория линейных импульсных систем. Физматгиз, 1963.