

УСИЛИТЕЛИ ИЗМЕНЕНИЙ ФАЗЫ С НАКОПИТЕЛЯМИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

Л. М. АНАНЬЕВ, С. Ф. ВАСИЛЕВСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры ПЭ)

При измерении малых фазовых сдвигов возникают трудности как в получении, так и в регистрации усредненного значения импульсов малой длительности, возрастающие при необходимости измерять относительно малые отклонения фазы от среднего ее значения. Одним из возможных путей преодоления этих трудностей является усиление отклонений фазы. Целесообразно иметь такое устройство, у которого изменения фазы на входе приводили бы к увеличенным в некоторое число раз k_{ϕ} изменениям фазы на его выходе.

Предварительные исследования показали, что хорошие результаты можно ожидать, если использовать для усиления изменений фазы процессы заряда (или разряда) накопительного элемента при скачкообраз-

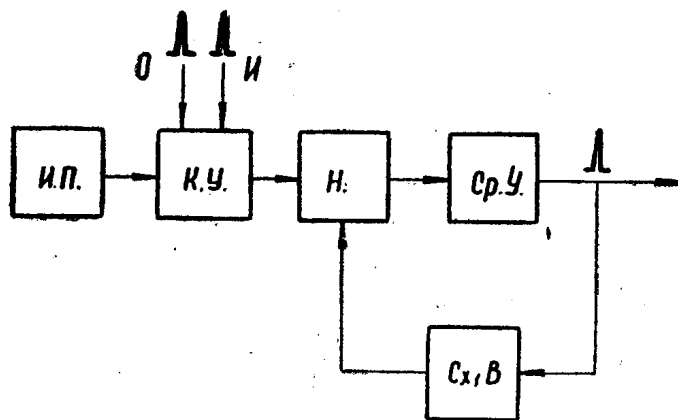


Рис. 1. Блок-схема усилителя изменений фазы:
О — опорный сигнал; И — интервальный сигнал, ИП — источник питания, КУ — коммутирующее устройство, Н — накопитель, СрУ — сравнивающее устройство, СхВ — схема восстановления.

ном изменении параметров цепи заряда. Обобщенная блок-схема такого усилителя изменений фазы (рис. 1) состоит из накопителя энергии Н, заряжаемого от источника питания ИП через коммутирующее устройство КУ, предназначенное для скачкообразного изменения пара-

метров зарядной цепи и коммутируемого за счет воздействия на него предварительно преобразованным опорным O и исследуемым (интервальным) I сигналами. В момент, когда накопитель H зарядится до заранее заданного уровня, на выходе сравнивающего устройства $CpУ$ появится импульс. Момент сравнения определяется параметрами цепи заряда накопителя до и после коммутации интервальным сигналом и моментом появления интервального сигнала. При изменении момента коммутации момент появления выходного импульса $CpУ$ также изменяется по определенному закону, причем это изменение на выходе больше входного в некоторое число раз. Это можно показать следующим образом.

Пусть с момента t_n поступления опорного сигнала накопитель энергии начинает заряжаться с некоторой скоростью, определяемой параметрами p_1, p_2, \dots, p_n цепи заряда

$$\dot{u}_1(t) = \frac{du_1}{dt} = f_1(p_1, p_2, \dots, p_n, t). \quad (1)$$

В момент t_0 поступления интервального сигнала I некоторый параметр p_i схемы путем коммутации скачком изменяет свое значение. С этого момента t_0 скорость изменения напряжения на накопителе скачком примет другое значение

$$\dot{u}_2(t) = \frac{du_2}{dt} = f_2(p_1, p_2, \dots, p'_i, \dots, p_n, t). \quad (2)$$

Отсюда напряжение на накопителе до $u_1(t)$ и после $u_2(t)$ момента t_0 появления интервального сигнала

$$u_1(t) = \int \dot{u}_1(t) dt + C_1, \quad (3)$$

$$u_2(t) = \int \dot{u}_2(t) dt + C_2, \quad (4)$$

где C_1, C_2 — постоянные интегрирования

$$C_1 = u_{01} - \left[\int \dot{u}_1(t) dt \right]_{t=0}, \quad (5)$$

$$C_2 = u_1(t_0) - \left[\int u_2(t) dt \right]_{t=t_0}, \quad (6)$$

а u_{01} — начальное напряжение на накопителе.

$u_1(t_0)$ — напряжение u_1 на накопителе в момент t_0 .

Момент сравнения t_1 , когда накопитель энергии зарядится до некоторого значения $u_{срав}$, которое может быть названо уровнем сравнения и при достижении которого на выходе сравнивающего устройства появится сигнал, определится из (4) и (6).

$$t_1 = \left[\int \frac{1}{\dot{u}_2(t)} du_2 \right]_{u_2 = u_{срав}} + C_4, \quad (7)$$

где

$$C_4 = t_0 - \left[\int \frac{1}{\dot{u}_2(t)} du_2 \right]_{u_2 = u_1(t_0)}. \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) видно, что при изменении момента t_0 на некоторую величину Δt_0 момент сравнения t_1 получит приращение Δt_1 . Очевидно, что если $\Delta t_1 > \Delta t_0$, то можно говорить об усилении изменений фазы Δt_0 . Это усиление можно оценить коэффициентом усиления изменений фазы k_ϕ , который равен отношению приращения Δt_1 момента t_1 , когда напряжение $u_2(t)$ на накопителе достигнет некоторого уровня

сравнения $u_{\text{срав}}$, к приращению Δt_0 момента t_0 появления интервального сигнала (2, 3)

$$k_{\phi} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_0} = 1 - \frac{d}{dt_0} \left\{ \left[\int \frac{du_2}{u_2} \right]_{u_2 = u_1(t_0)} \right\}. \quad (9)$$

Достаточным условием получения усиления изменений фазы будет

$$\left| \frac{d}{dt_0} \left\{ \left[\int \frac{du_2}{u_2} \right]_{u_2 = u_1(t_0)} \right\} \right| > 2. \quad (10)$$

При экспоненциально изменяющемся напряжении на накопителе получим

$$k_{\phi} = 1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} = 1 - \frac{\dot{u}_1(t_0)}{u(t_0)}, \quad (11)$$

где τ_1, τ_2 — постоянные цепи заряда накопителя до и после момента t_0 .

Таким образом, коэффициент усиления изменений фазы определяется соотношением скоростей заряда $\frac{\dot{u}_1(t_0)}{u_2(t_0)}$ (или постоянных цепи заряда $\frac{\tau_2}{\tau_1}$) до и после момента t_0 появления интервального импульса, определяющего момент коммутации.

Нетрудно заметить, что условие усиления изменений фазы выполняется при различной последовательности заряд-разрядных процессов на накопителе до и после момента t_0 коммутации. Возможны 4 случая: заряд — заряд, разряд — заряд, заряд — разряд, разряд — разряд, которые неравноценны в отношении погрешностей усиления изменений фазы.

Можно показать, что основная погрешность связана с нестабильностью уровня сравнения и равна

$$\delta k_{\phi} = \frac{\tau_1 \cdot u_{\text{срав}} \cdot \delta u_{\text{срав}}}{\Delta t_0 \cdot (E - u_{\text{срав}})}. \quad (12)$$

Из выражения (12) видно, что для уменьшения погрешности из-за нестабильности уровня сравнения необходимо уменьшать величину порога сравнения $u_{\text{срав}}$. Поэтому для уменьшения δk_{ϕ} выгодно применять схемы УИФ, у которых выходное напряжение после момента t_0 коммутации уменьшается (например, заряд — разрядную).

В качестве накопителя энергии возможно применение, как индуктивного, так и емкостного накопителя. УИФ с индуктивным накопителем целесообразно применять при постоянных фазовых сдвигах $t_0 < 10^{-5}$ сек. Для получения больших коэффициентов усиления изменений фазы k_{ϕ} целесообразно применение УИФ смешанного типа, т. е. таких, в которых сочетаются накопители L и C .

В качестве примера на рис. 2 приведена схема простейшего УИФ типа RC (с емкостным накопителем). В исходном состоянии лампы L_1 и L_2 открыты; сопротивление R_{a2} в аноде лампы L_2 отрегулировано таким образом, что в исходном состоянии падения напряжения на анодах ламп равны и, следовательно, начальное напряжение на конденсаторе C равно 0. В момент t_n отрицательный прямоугольный импульс длительностью $\tau_n \gg t_0$ с преобразователя импульсов, запускаемого опорным сигналом, поступает на вход 1 м, запирает лампу L_1 . Благодаря скачку напряжения на аноде L_1 конденсатор C начинает заряжаться через

диод \mathcal{L}_3 и лампу \mathcal{L}_2 . Так как сопротивление R_0 много больше внутреннего сопротивления R_{i2} лампы \mathcal{L}_2 , то его влиянием на процесс заряда можно пренебречь. В момент t_0 коммутации на вход 2 поступает такой же отри-

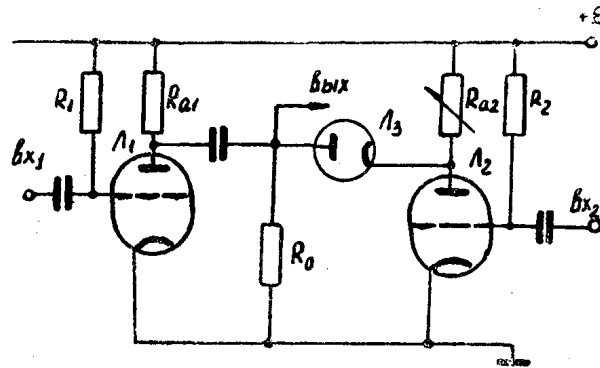


Рис. 2. Схема УИФ типа RC.

цательный прямоугольный импульс, но уже с преобразователя, запускаемого интервальным сигналом. Лампа \mathcal{L}_2 запирается, конденсатор C будет продолжать заряжаться через сопротивление R_0 . Так как $R_0 \gg R_{i2} + R_{i3}$, то $\tau_1 < \tau_2$, что необходимо для усиления изменений фазы.

Для данной схемы

$$|k_\phi| = \left| 1 - \frac{R_0}{R_{i2} + R_{i3}} \right| > 1.$$

Выходное напряжение, поступающее на устройство сравнения $CpУ$, пропорционально току заряда, что дает возможность использовать низкие значения порога сравнения $u_{срав}$. Положительными свойствами рассматриваемой схемы УИФ являются самовосстанавливаемость, заземленные катоды обеих коммутирующих ламп, возможность получения значительных k_ϕ . Схема УИФ типа RL приведена на рис. 3, а.

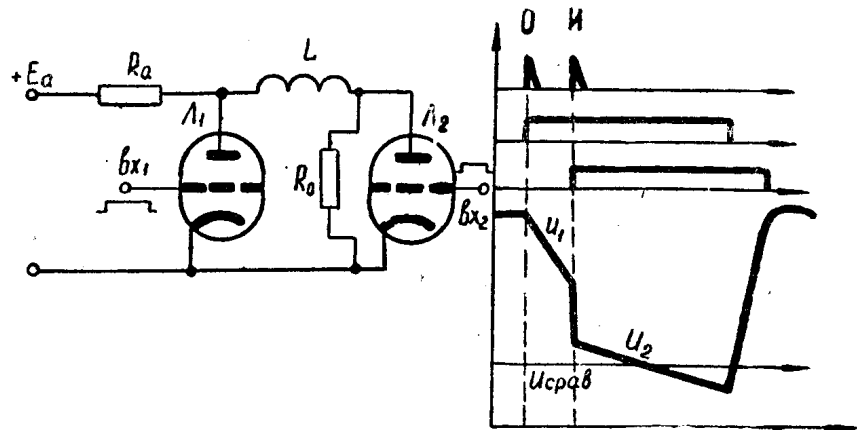


Рис. 3. Схема УИФ типа RL (а) и временные диаграммы к ней (б)

В начальном состоянии лампы \mathcal{L}_2 и \mathcal{L}_1 закрыты, ток в цепи $R_a - L - R_0$ наибольший. В момент t_n появления опорного сигнала положительный прямоугольный импульс, поступающий на вход 1, отпирает лам-

пу L_1 , потенциал ее анода понижается и ток через индуктивность L начинает убывать с постоянной времени (1):

$$\tau_1 = \frac{L(R_{i1} + R_a)}{R_{i1} \cdot R_a + R_{i1} R_0 + R_0 R_a}$$

В момент t_0 поступления интервального импульса отпирается лампа L_2 . Ток через индуктивность продолжает убывать, но уже с другой постоянной времени

$$\tau_2 = \frac{L(R_{i1} + R_a)}{R_{i1} R_a + R_{i1} \cdot R_{i2} + R_{i2} R_a}$$

Поэтому

$$k_\Phi = 1 \frac{R_{i1} R_a + R_{i1} R_0 + R_0 R_a}{R_{i1} R_a + R_{i1} R_{i2} + R_{i2} R_a} \quad (14)$$

Эта схема УИФ имеет низкий уровень сравнения $u_{срав}$, самовосстанавливается, дает значительные k_Φ , простота в осуществлении коммутации. Рассмотренные схемы УИФ целесообразно применять в фазометрической аппаратуре, предназначенной для измерения относительно небольших отклонений фазы от некоторого постоянного значения. Блок-схема такого фазометра на основе УИФ приведена на рис. 4.

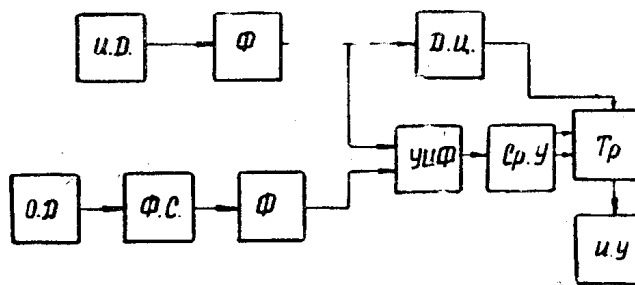


Рис. 4. Блок-схема фазометра на основе усилителя изменений фазы:
 ОД — опорный датчик, ИД — измерительный датчик, Ф — формирователь, УИФ — усилитель изменений фазы, СрУ — сравнивающее устройство, Тр — триггер, ИУ — измерительное устройство, ДЦ — дифференцирующая цепочка, ФС — фазосдвигатель

Сдвинутые во времени в соответствии с фазовым сдвигом опорный и интервальный сигналы датчиков поступают на формирователь Φ своего канала. При исследовании импульсных сигналов формирователь состоит из усилителя, ограничителя, дифференцирующих цепей и ждущего мультивибратора; при гармонических сигналах — из усилителя, ограничителя и триггера Шмидта.

Сформированные импульсы со движом по фазе поступают на входы УИФ. С помощью сравнивающего устройства СрУ и триггера Тр усиленные изменения фазы преобразуются в изменения напряжения, регистрируемые измерительным устройством ИУ. Это осуществляется следующим образом. Опережающий импульс опорного канала после формирования и дифференцирования перебрасываем триггер Тр в состояние 1. В момент, когда напряжение на выходе УИФ достигнет уровня сравнения, сравнивающее устройство выдаст сигнал, переворачивающий триггер в исходное состояние. При изменении фазового сдвига между

сигналами датчика на Δt_0 длительность выходного сигнала триггера изменится на $k_\Phi \cdot \Delta t_0$, а изменения среднего значения регистрируемого напряжения будут равны

$$\Delta \bar{u} = \frac{u_m}{T} k_\Phi \cdot \Delta t_0, \quad (15)$$

где u_m — амплитуда импульса на выходе триггера,
 T — период следования импульсов.

Среднее значение напряжения выходного сигнала триггера регистрируется с помощью измерительного устройства, в котором измерительный прибор включен так, чтобы скомпенсировать показание, соответствующее постоянному фазовому сдвигу.

Предусмотренное в схеме фазосдвигающее ΦC устройство предназначено для «установки нуля» в начале измерения.

Применение УИФ дает возможность значительно увеличить чувствительность и разрешающую способность фазометрической аппаратуры.

Условные обозначения

- K_Φ — коэффициент усиления изменений фазы,
- δK_Φ — относительная погрешность усиления изменений фазы,
- t — время,
- t_n — момент появления опорного сигнала,
- t_0 — момент коммутации,
- t_1 — момент сравнения,
- Δt_0 — изменение момента коммутации,
- Δt_1 — изменение момента сравнения,
- T — период следования импульсов,
- τ_u — длительность импульса,
- τ_1 — постоянная цепи заряда до момента t_0 ,
- τ_2 — постоянная цепи заряда после момента t_0 коммутации,
- u_1, u_2 — напряжение до и после момента t_0 коммутации,
- u_1, u_2 — скорость изменения напряжения до и после момента t_0 коммутации,
- $u_{срав}$ — напряжение сравнения,
- $\delta u_{срав}$ — относительная нестабильность уровня сравнения.
- u_{01} — начальное напряжение на накопителе.
- $u_1(t_0)$ — напряжение на накопителе в момент t_0 ,
- u_m — амплитуда импульса на выходе триггера,
- P — параметр цепи заряда накопителя,
- C_k — некоторая постоянная интегрирования,
- R_a — анодное сопротивление,
- R_i — внутреннее сопротивление лампы,
- R_0 — сопротивление цепи заряда накопителя после момента t_0 .
- C — емкость
- L — индуктивность,
- L — электронная лампа,

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, М.—Л., ч. 2, 1959.
2. Л. М. Ананьев и др. Индукционный ускоритель электронов — бетатрон. Госатомиздат, 1961.
3. Удостоверение о регистрации № 51146, 1965.