

4. В а с и н Н.Н., Т у з о в А.П. Оценка влияния времени коммутации ключа на точность преобразователя малых постоянных напряжений. - В кн.: Автоматизация экспериментальных исследований. - Куйбышев: КуАИ, 1976.

УДК 621.317

Л.Э. Вилоп

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕГРИРУЮЩЕГО
АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
С ИНДУКТИВНЫМ ДАТЧИКОМ

(г. Куйбышев)

Большинство современных систем сбора информации, используемых при экспериментальных исследованиях и испытаниях сложных технических объектов, осуществляют измерение изменяющихся физических величин. При этом динамические характеристики используемого в системе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) могут оказывать существенное влияние на достоверность получаемых результатов. В частности, это относится к групповым интегрирующим АЦП двухтактного интегрирования, которые благодаря своим достоинствам широко применяются в системах измерения медленно меняющихся величин с резисторными и генераторными датчиками. В таких системах изменение измеряемой величины на интервале интегрирования приводит к появлению динамической погрешности - несоответствию полученного результата значению измеряемой величины в момент окончания первого такта интегрирования. Если на измеряемую величину наложены высокочастотные пульсации, что характерно для многих технических объектов, то вследствие интегрирования происходит уменьшение влияния пульсаций и повышение точности кодирования медленно меняющейся составляющей контролируемого процесса.

Применительно к измерительным системам с индуктивными датчиками групповой АЦП двухтактного интегрирования может быть реализован на основе одного из методов тестовых переходных процессов - метода интегрирующего преобразования /1,2/. При этом значение информативного параметра опрашиваемого датчика определяется интегрированием в первом такте реакции измерительной цепи (ИЦ) на ее подключение к источнику постоянного напряжения. При подключении к источнику напряжения E переходный процесс в цепи с последовательно соединенными сопро-

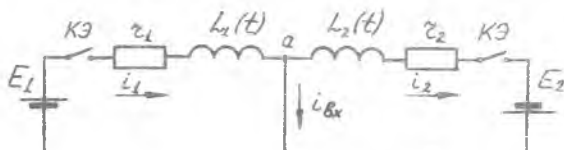
тивлением Z и индуктивностью L описывается дифференциальным уравнением $d\psi/dt + iZ = E$, где ψ - потокосцепление катушки индуктивности. Если величина индуктивности зависит от времени, то $\psi = L(t)i$, и уравнение цепи имеет вид

$$L \frac{di}{dt} + i \left(\frac{dL}{dt} + Z \right) = E. \quad (1)$$

В зависимости от величины входного сопротивления интегратора в АЦП может происходить интегрирование тока ($R_{BX} = 0$) или напряжения ($R_{BX} = \infty$). При токовом входе (ТВ) и дифференциальном индуктивном датчике ИЦ состоит из двух независимых ZL -контуров (рис.1). При опросе датчика в первом такте контура одновременно подключаются к разнополярным источникам напряжения E_1 и E_2 . Разность токов переходных процессов $i_1(t) - i_2(t) = i_{BX}(t)$ в течение времени t_u подается на вход интегратора. Во втором такте от источника E_2 (при $L_1 < L_2$) через резистор R на вход интегратора подается ток разряда. Выражение, определяющее время полного разряда емкости интегратора, является функцией преобразования АЦП /2/:

$$T = \frac{R}{E} \int_0^{t_u} i_{BX}(t) dt. \quad (2)$$

Для оценки динамической погрешности группового АЦП достаточно рассмотреть случай линейного изменения индуктивности датчика на интервале интегрирования. Это обусловлено тем, что на интервале времени, равном периоду наимвышей из частот спектра контролируемых процессов, групповой АЦП должен производить многократное кодирование зна-



Р и с. 1. Эквивалентная схема измерительной цепи

чений информативных параметров всех опрашиваемых датчиков, и малый участок синусоиды с высокой степенью точности может быть заменен отрезком прямой. При этом индуктивности дифференциального датчика могут быть определены следующим образом:

$$L_1(t) = L_0(1 - \varepsilon_H - kt),$$

$$L_2(t) = L_0(1 + \varepsilon_H - kt), \quad (3)$$

где L_0 - индуктивности датчика при нулевом значении измеряемой физической величины; $\varepsilon_H = \Delta L_H / L_0$ - относительный разбаланс индуктивностей в начале интегрирования; $k = \frac{dL(t)}{dt} \frac{1}{L_0}$ - относительная скорость изменения индуктивности.

Пусть $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$, $E_1 = E_2 = E$, тогда уравнение (1) для тока i_1 с учетом того, что $dL_1/dt = -kL_0$, запишется в виде $L_0(1 - \varepsilon_H - kt) di_1/dt + i_1(\varepsilon - kL_0) = E$ или

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{\varepsilon - kL_0}{L_0(1 - \varepsilon_H - kt)} i_1 = \frac{E}{L_0(1 - \varepsilon_H - kt)}. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение (4) имеет аналитическое решение, которое при нулевых начальных условиях может быть записано в виде

$$i_1(t) = \frac{E}{\varepsilon(1 - \tau_0 k)} \left[1 - \left(\frac{1 - \varepsilon_H - kt}{1 - \varepsilon_H} \right)^{-\left(1 + \frac{1}{\tau_0 k}\right)} \right], \quad (5)$$

где $\tau_0 = L_0/\varepsilon$ - постоянная времени катушки датчика при $\varepsilon = 0$.

Выражение для тока i_2 можно получить из формулы (5), изменив знаки перед ε_H и k на противоположные:

$$i_2(t) = \frac{E}{\varepsilon(1 + \tau_0 k)} \left[1 - \left(\frac{1 + \varepsilon_H - kt}{1 + \varepsilon_H} \right)^{-\left(1 + \frac{1}{\tau_0 k}\right)} \right]. \quad (6)$$

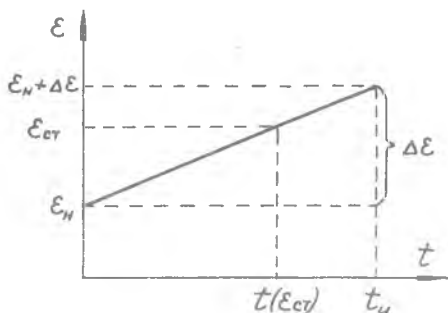
В первом такте входной ток интегратора $i_{BX}(t) = i_1(t) - i_2(t)$, где $i_1(t)$ и $i_2(t)$ определяются формулами (5) и (6). Подставив $i_{BX}(t)$ в выражение (2) после интегрирования и несложных преобразований, учитывая, что $k = \Delta\varepsilon/t_u$ и $\tau_0 k = \Delta\varepsilon/\alpha$, где $\Delta\varepsilon$ - изменение ε за время t_u , а $\alpha = t_u/\tau_0$, получим функцию преобразования интегрирующего АЦП с дифференциальным индуктивным датчиком для случая линейного изменения индуктивности:

$$T_n = \frac{R\tau_0}{\varepsilon} Q, \quad \text{где}$$

$$Q = \frac{m}{m^2 - 1} \left\{ 2\alpha + \beta(m+1) \left[\left(\frac{\beta - \Delta\varepsilon}{\beta} \right)^m - 1 \right] - \alpha(m-1) \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha + \Delta\varepsilon} \right)^m - 1 \right] \right\};$$

$$m = \alpha/\Delta\varepsilon; \quad \beta = 1 - \varepsilon_H; \quad \alpha = 1 + \varepsilon_H.$$

Приведенная к диапазону ε_{\max} динамическая погрешность, возникающая при линейном изменении ε за время t_u на величину $\Delta\varepsilon$ (рис. 2) может быть определена следующим образом:



Р и с. 2. К определению динамической погрешности

$$\delta_{\text{дин}} = \frac{\varepsilon_H + \Delta\varepsilon - \varepsilon_{\text{ст}}}{\varepsilon_{\text{макс}}}, \quad (7)$$

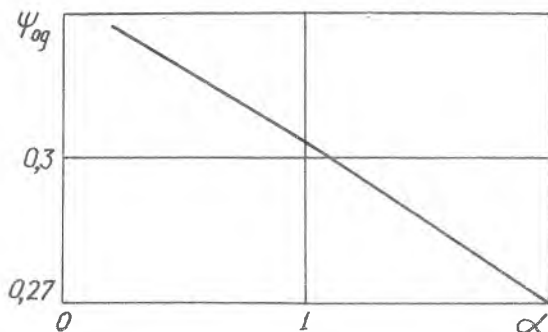
где $\varepsilon_{\text{ст}}$ — статическое, неизменное во времени значение ε , дающее при интегрировании такой же результат как и ε , линейно изменяющееся за время t_u от ε_H до $\varepsilon_H + \Delta\varepsilon$.

Значение $\varepsilon_{\text{ст}}$ может быть найдено решением трансцендентного относительно ε уравнения $T_{\text{л}} = T(\varepsilon)$, где $T(\varepsilon)$ — статическая функция преобразования АЦП [2]:

$$T(\varepsilon) = \frac{R\tau_0}{z} \left[2\varepsilon + (1-\varepsilon)\exp\left(-\frac{\alpha}{1-\varepsilon}\right) - (1+\varepsilon)\exp\left(-\frac{\alpha}{1+\varepsilon}\right) \right]. \quad (8)$$

Формула (7) отражает относительное несоответствие результата преобразования значения ε в момент окончания первого такта интегрирования. Численный анализ формулы (7) для $0,2 \leq \alpha \leq 3$ показал, что $\delta_{\text{дин}}$ линейно зависит от величины $\Delta\varepsilon$ и не зависит от ε_H , т.е. является аддитивной погрешностью. Это позволяет однозначно определить нормированную функцию влияния [3] линейного изменения ε , $\psi_{\text{од}} = (\varepsilon_H + \Delta\varepsilon - \varepsilon_{\text{ст}}) / \Delta\varepsilon$. Функция $\psi_{\text{од}}(\alpha)$ (рис.3) зависит только от величины α и может быть использована для определения $\delta_{\text{дин}}$ АЦП с ТВ $\delta_{\text{дин}} = \psi_{\text{од}} \Delta\varepsilon / \varepsilon_{\text{макс}}$.

В системах сбора информации динамическая погрешность может быть уменьшена введением временной поправки момента отсчета. Необходимым условием возможности такой поправки является независимость $t(\varepsilon_{\text{ст}})$ (см.рис.2) от значений ε_H и $\Delta\varepsilon$. Из рис.2 следует, что относительная временная поправка $\frac{\Delta t}{t_u} = \frac{t_u - t(\varepsilon_{\text{ст}})}{t_u} = \frac{\varepsilon_H + \Delta\varepsilon - \varepsilon_{\text{ст}}}{\Delta\varepsilon} = \psi_{\text{од}}$.



Р и с. 3. Нормированная функция влияния линейного изменения ε

Следовательно, $\Delta t/t_u$ так же, как $\psi_{0\delta}$, не зависит от ε_H и $\Delta \varepsilon$ и определяется только значением α , поэтому для системы сбора с известным α по графику функции $\psi_{0\delta}(\alpha)$ (см.рис.3) можно определить поправку момента отсчёта и тем самым свести динамическую погрешность к пренебрежимо малой величине. Так например, для системы с $\alpha = 0,5$ результаты кодирования следует относить к моментам времени, отстоящим за $\psi_{0\delta}(\alpha=0,5)t_u = 0,319t_u$ до окончания первого такта интегрирования.

В эквивалентной схеме ИЦ АЦП с потенциальным входом (ПВ) соединение между точкой "а" (см.рис.1) и общей шиной отсутствует, ток $i_1 = i_2 = i$, а выходным сигналом ИЦ является напряжение в точке "а":

$$U_{\delta 01x}(t) = L_2 \frac{di}{dt} + i \frac{dL_2}{dt} + iz = E. \quad (9)$$

Постоянная времени ИЦ при этом определяется суммарной индуктивностью $L_1(t) + L_2(t)$ и суммарным сопротивлением $Z_1 + Z_2 = 2z$. При дифференциальном изменении индуктивностей датчика в соответствии с выражениями (3) $L_1(t) + L_2(t) = 2L_0$, а ток переходного процесса и его производная соответственно равны:

$$i(t) = \frac{E}{Z} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \right]; \quad \frac{di}{dt} = \frac{E}{L_0} \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right).$$

Подставляя выражения для i ; di/dt ; $L_2(t)$ dL_2/dt в уравнение (9), после несложных преобразований получаем

$$U_{\text{вых}}(t) = E \left\{ \tau_0 k + [\varepsilon_H + k(t - \tau_0)] \exp(-t/\tau_0) \right\}.$$

В АЦП с ПВ заряд и разряд интегратора происходят через один и тот же резистор R . После подстановки $i_{\text{вх}}(t) = U_{\text{вх}}(t)/R$ в выражение (2) интегрирования получим функцию преобразования АЦП с ПВ для случая линейного изменения индуктивности:

$$T = \tau_0 (\varepsilon_H + \Delta\varepsilon) [1 - \exp(-\alpha)]. \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что результат, получаемый на выходе АЦП с ПВ, соответствует значению измеряемой величины в момент окончания интегрирования, т.е. в соответствии с принятым определением динамическая погрешность АЦП с ПВ равна нулю. Анализ показывает, что аналогичный результат получается и для любой другой, в частности, синусоидальной зависимости ε от времени. Это означает, что в АЦП с ПВ несмотря на интегрирование не происходит подавления пульсаций измеряемой величины.

Рассмотрим влияние пульсаций на результат преобразования в АЦП с ТВ. Зависимость индуктивностей датчика от времени при этом может быть определена следующим образом:

$$L_1(t) = L_0 [1 - \varepsilon_H - \Delta\varepsilon_m \sin(\omega_n t + \varphi)],$$

$$L_2(t) = L_0 [1 + \varepsilon_H + \Delta\varepsilon_m \sin(\omega_n t + \varphi)],$$

где $\omega_n = 2\pi/T_n$ - частота пульсации, $\Delta\varepsilon_m$ - амплитуда пульсации.

Ток в контуре с индуктивностью L_1 описывается дифференциальным уравнением (I), в котором $L_1 = L_0 [1 - \varepsilon_H - \Delta\varepsilon_m \sin(\omega_n t + \varphi)]$ $dL_1/dt = -\Delta\varepsilon_m \omega_n L_0 \cos(\omega_n t + \varphi)$. При этом уравнение (I) может быть решено только численными методами. Подставив L_1 и dL_1/dt в уравнение (I) и произведя необходимые преобразования, получим

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{I_0 - [1 - \omega_n \tau_0 \Delta\varepsilon_m \cos(\omega_n t + \varphi)] V_1}{\tau_0 [\beta - \Delta\varepsilon_m \sin(\omega_n t + \varphi)]}, \quad (11)$$

где $I_0 = E/Z$.

Обозначив $v = t/\tau_0$, $h = \tau_0/T_n$, $V_1 = i_1/I_0$, запишем уравнение (11) в следующем виде:

$$\frac{dV_1}{d\vartheta} = \frac{1 - [1 - 2\pi h \Delta \varepsilon_m \cos(2\pi h \vartheta + \varphi)] V_1}{\vartheta - \Delta \varepsilon_m \sin(2\pi h \vartheta + \varphi)} \quad (12)$$

Решением уравнения (12) является зависимость нормированного по \mathcal{J}_0 тока i_1 от нормированного по τ_0 времени t .

Зависимость V от ϑ представляет самостоятельный интерес с точки зрения физической интерпретации получаемых далее результатов. На рис. 4 приведены графики решения уравнения (12) методом Рунге-Кутты 4-го порядка для $\Delta \varepsilon_m = 0,2$; $\vartheta = 1$ ($\varepsilon_H = 0$); $h = 2$ и экспоненциальная составляющая тока $V_2(\vartheta) = 1 - \exp(-\vartheta)$.

На рис. 5 приведены графики отклонений функции $V(\vartheta)$ от экспоненциальной составляющей для $h = 1$; $\varphi = 0$ - кривая 1, $h = 1$; $\varphi = \pi/2$ - кривая 2, $h = 2$; $\varphi = 0$ - кривая 3 и огибающая экстремумов отклонений тока для $h = 10$; $\varphi = 0$ - кривая 4. Из них следует, что амплитуда отклонений пропорциональна экспоненциальной составляющей и не зависит от ω_n , а изменения тока противофазны изменениям индуктивности.

Аналогично уравнению (12) для контура с индуктивностью L_2 можно записать

$$\frac{dV_2}{d\vartheta} = \frac{1 - [1 + 2\pi h \Delta \varepsilon_m \cos(2\pi h \vartheta + \varphi)] V_2}{c + \Delta \varepsilon_m \sin(2\pi h \vartheta + \varphi)} \quad (13)$$

Заряд, приобретаемый интегратором в первом такте, может быть найден численным интегрированием разности решений уравнений (12) и (13) в пределах от 0 до α . С учетом того, что $i = V\mathcal{J}_0$ и $t = \vartheta\tau_0$,

$$\int_0^{t_u} i_{\text{вх}}(t) dt = \mathcal{J}_0 \tau_0 \int_0^\alpha [V_1(\vartheta) - V_2(\vartheta)] d\vartheta \quad (14)$$

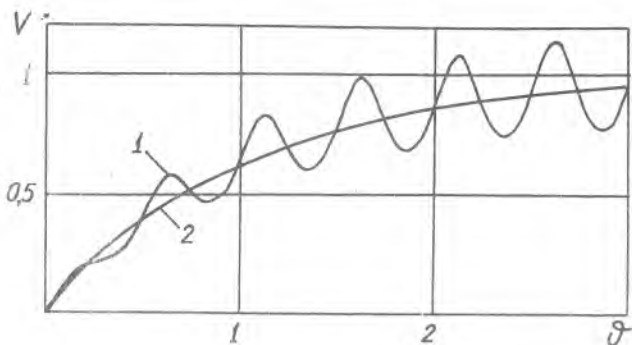
Подставляя выражение (14) в (2) и учитывая, что $\mathcal{J}_0 = E/z$, получим функцию преобразования АЦП с ТВ для случая синусоидальных пульсаций индуктивности:

$$T_c = \frac{R\tau_0}{z} \int_0^\alpha [V_1(\vartheta) - V_2(\vartheta)] d\vartheta.$$

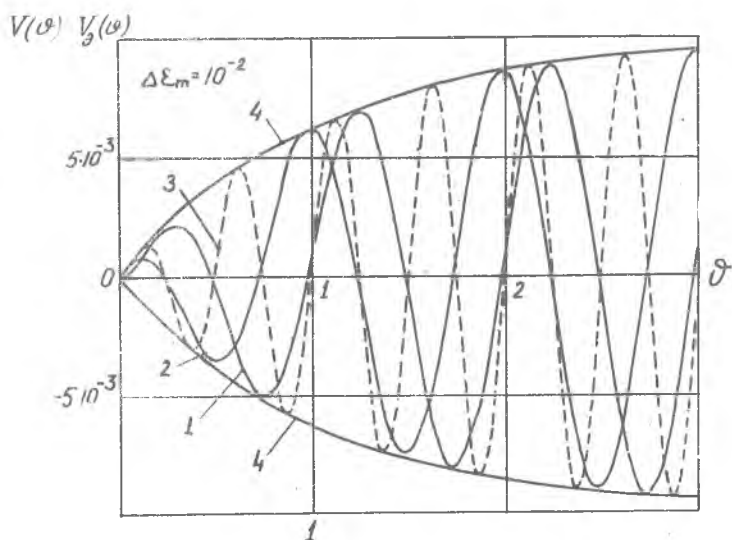
Влияние пульсаций индуктивности оценим при помощи коэффициента влияния пульсаций $K_{ВП}$, который определим следующим образом:

$$K_{ВП} = \frac{|T_c(\varepsilon_H; \Delta \varepsilon_m; h; \varphi) - T(\varepsilon_H)|}{T(\varepsilon_H + \Delta \varepsilon_m) - T(\varepsilon_H)},$$

где значения $T(\varepsilon)$ определяются по формуле (8).

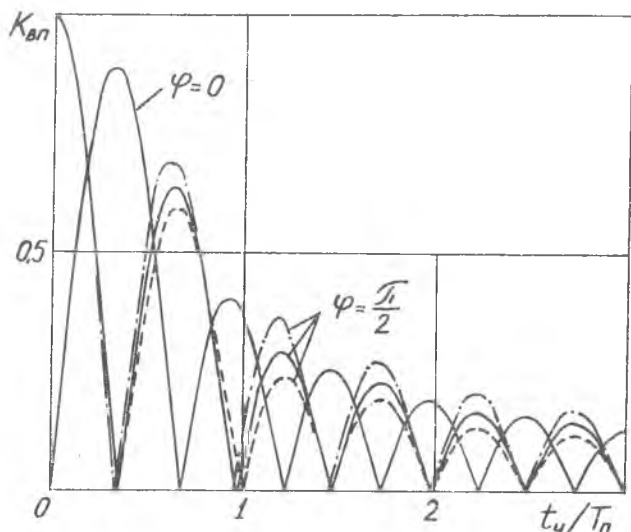


Р и с. 4. Переходный процесс в zL -контуре с изменяющейся (1) и неизменной (2) индуктивностью



Р и с. 5. Отклонение функции $V(t)$ от экспоненциальной составляющей (1-3) и огибающая экстремумов отклонений (4)

$K_{ВП}$ характеризует уменьшение влияния пульсаций, обусловленное интегрированием выходного сигнала ИЦ. Из графика функции $K_{ВП}(t_u/T_n)$, где $t_u/T_n = \alpha h$, приведенного на рис.6, следует, что так же, как в интегрирующих АЦП постоянного напряжения, значения максимумов $K_{ВП}$ уменьшаются с увеличением времени интегрирования. Существенным отличием при этом является то, что независимо от фазы φ функция $K_{ВП}(t_u/T_n)$ имеет нули через t_u , кратное не периоду, а полупериоду пульсации. Это обусловлено тем, что в рассматриваемом АЦП в связи с использованием переходного процесса в ИЦ интегрирование пульсации при $0 < \alpha < 2$ происходит с весом, пропорциональным разности экспоненциальных составляющих входного тока интегратора.



Р и с. 6. Зависимость коэффициента влияния пульсаций от t_u/T_n : --- $\alpha = 2$; — $\alpha = 1$; - - - $\alpha = 0,25$

По графикам функций $K_{ВП}(t_u/T_n)$ можно производить приближенную оценку создаваемой пульсациями погрешности $\delta_n = K_{ВП} \Delta \varepsilon_m / \varepsilon_{макс}$. При этом, однако, следует учитывать, что начальная фаза пульсации φ является случайной величиной, поэтому определение $K_{ВП}$ необходимо производить по огибающей максимумов функции $K_{ВП}(t_u/T_n)$ для конкретного значения α .

Анализ влияния пульсаций на переходный процесс в ZL -контуре и результат преобразования интегрирующих АЦП с ПВ и ТВ позволяет сделать вывод о том, что применительно к измерительным системам с индуктивными датчиками единственным среди АЦП, основанных на методах тестовых переходных процессов, в котором возможна фильтрация пульсаций измеряемой величины, является интегрирующий АЦП с ТВ.

Л и т е р а т у р а

1. С к о б е л е в О.П. Методы преобразования и устройства сбора измерительной информации. - Куйбышев: КуАИ, 1980. - 83 с.

2. В и л о п Л.Э. Анализ измерительной схемы с двухтактным интегрированием для индуктивных первичных преобразователей. - В кн.: Автоматизация экспериментальных исследований. - Куйбышев: КуАИ, 1976, с.108-114.

3. В и л о п Л.Э. Влияние входного сопротивления интегратора на характеристики интегрирующего преобразователя. - В кн.: Автоматизация научных исследований. - Куйбышев: КуАИ, 1984, с.109-116.

УДК 681.3:621.391.26

Ж.Т. Сайфуллин

УСТРАНЕНИЕ ДРЕЙФА БАЗОВОЙ ЛИНИИ
В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ
ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

(г.Куйбышев)

Корреляционная хроматография - метод хроматографического анализа, специфика которого состоит в том, что обычное нормальное регулярное введение пробы заменяют более частым, случайным введением образцов малого объема. Промежуток времени между вводами пробы на один-два порядка меньше, чем время выхода последнего пика на хроматограмме и составляет две-четыре секунды. Порядок ввода образца в