

УДК 531.768

Л.В. Денисов, канд. техн. наук,**С.Р. Зиборов, доцент, канд. техн. наук,****Д.В. Моисеенко, инженер***Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053,**E-mail: sergey.ziborov@gmail.com***МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОНТАКТА ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ**

Рассмотрен метод измерения параметров движения контакта вакуумного выключателя, основанный на зависимости межконтактной емкости выключателя от расстояния между контактами. Предложены структурная схема измерителя параметров движения и алгоритм обработки измерительных сигналов.

Ключевые слова: контакт, параметры движения, выключатель, межконтактная емкость

В настоящее время в промышленных сетях напряжением от 10 до 12 кВ широкое применение находят вакуумные выключатели, основным узлом которых является вакуумная дугогасительная камера (ВДК).

Если выключатель находится под напряжением, то при его включении и отключении в межконтактном промежутке возникает электрическая дуга. Время существования дуги зависит от скорости движения подвижного контакта ВДК. Кроме того, каждое включение выключателя сопровождается механическим ударом подвижного контакта ВДК по неподвижному, сила которого также зависит от скорости подвижного контакта. Указанные явления вызывают износ ВДК и могут вызвать отказ выключателя. Поэтому наибольший интерес представляет знание параметров движения подвижного контакта ВДК при включении выключателя на временном интервале, предшествующем моменту замыкания контактов, а при его отключении на временном интервале, непосредственно следующим за моментом размыкания контактов.

Целью данной статьи является разработка метода измерения параметров движения контакта ВДК и структурной схемы измерителя, реализующего этот метод.

На рисунке 1 изображены упрощенная конструкция и эквивалентная электрическая схема ВДК.

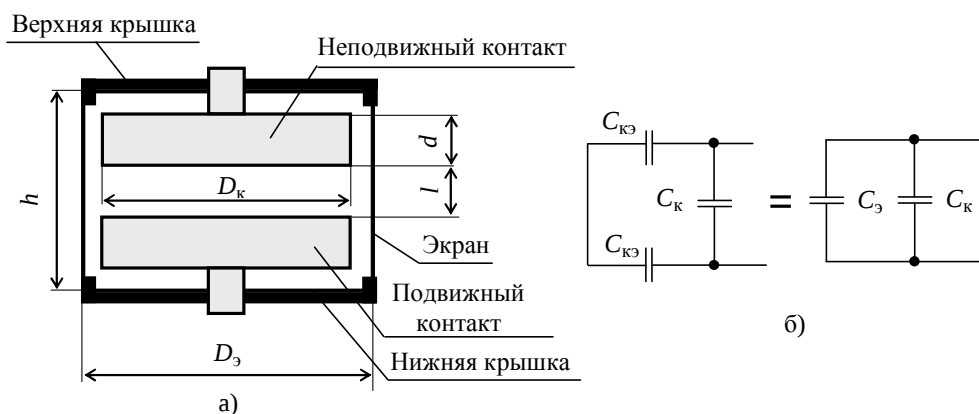


Рисунок 1 – Упрощенная конструкция (а) и эквивалентная электрическая схема (б) ВДК

Контакты ВДК представляют собой круглые металлические диски диаметром D_k , расположенные в исходном состоянии на расстоянии l . Контакты ВДК окружены круглым металлическим экраном диаметром $D_э$. Экран впаян своими торцами в диэлектрические крышки. Поэтому можно считать, что экран изолирован от других деталей выключателя. В верхнюю крышку ВДК вмонтирован неподвижный контакт, а в нижнюю – металлический гофрированный цилиндр (на рисунке 1 не показан), в дно которого вварен подвижный контакт. Замыкание контактов происходит при расстоянии между контактами порядка $x \approx 0,1$ мм, что соизмеримо с неровностями и возможными перекосами поверхностей контактов.

Исходя из конструкции ВДК (рисунок 1, а), была предложена ее эквивалентная электрическая схема (рисунок 1, б). Схема состоит из емкости C_k , образованной контактами ВДК, и двух последовательно включенных емкостей $C_{кз}$, образованных контактами и экраном.

Емкость C_k определяется по формуле, используемой для расчета емкости плоского конденсатора,

$$C_k = \frac{\epsilon_0 \pi r_k^2}{x}, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12}$ Кл/Вм — диэлектрическая постоянная; $r_k = D_k/2$ — радиус контактов; x — расстояние между контактами, которое изменяется от нуля до l .

Емкость $C_{кз}$ определяется по формуле, используемой для расчета емкости цилиндрического конденсатора,

$$C_{кз} = \frac{2\pi\epsilon_0 d}{\ln(r_3/r_k)},$$

где d — толщина контакта; $r_3 = D_3/2$ — внутренний радиус экрана.

Последовательно соединенные емкости $C_{кз}$ можно заменить одной эквивалентной емкостью $C_3 = C_{кз}/2$, которая далее называется экранной емкостью ВДК.

Поскольку высота экрана $h > 2d + l$, то при перемещении подвижного контакта экранная емкость практически не изменяется, и далее предполагается, что $C_3 = \text{const}$.

На рисунке 2 изображена зависимость межконтактной емкости ВДК от расстояния между контактами.

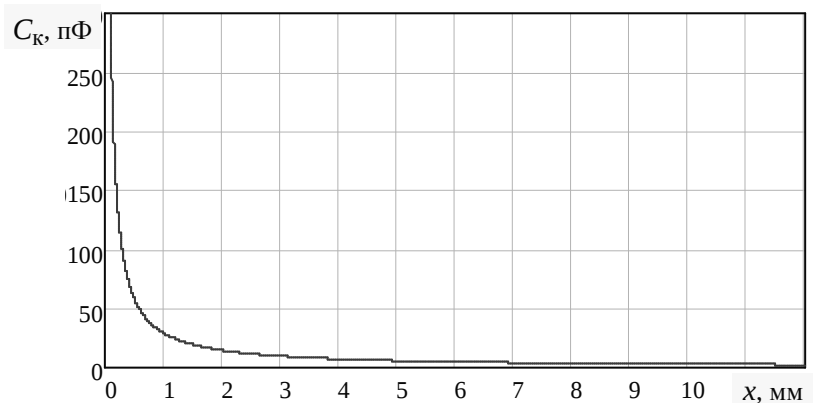


Рисунок 2 – Зависимость межконтактной емкости от расстояния между контактами

Из рисунка 2 видно, что при $x < 1$ мм крутизна зависимости $C_k(x)$ резко возрастает. В этой связи представляет интерес использование межконтактной емкости ВДК в качестве датчика перемещения подвижного контакта. К достоинствам такого датчика можно отнести:

- высокую чувствительность в области малых значений x , при которых возникает электрическая дуга в межконтактном промежутке и происходит соударение контактов;
- возможность измерения перемещения непосредственно подвижного контакта.

На рисунке 3 изображена структурная схема измерителя перемещения подвижного контакта вакуумного выключателя.

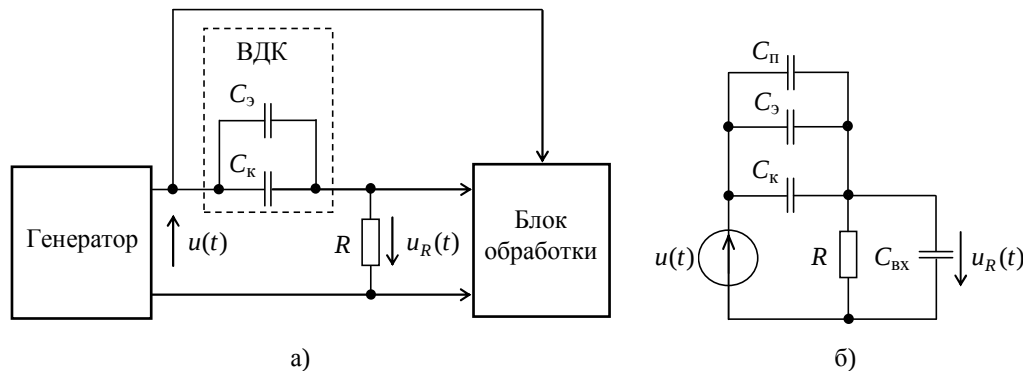


Рисунок 3 – Измеритель перемещения (а) и эквивалентная схема измерительной цепи (б)

Генератор вырабатывает гармоническое напряжение $u(t) = U_m \cos 2\pi f t$, где U_m , f – амплитуда и частота напряжения соответственно. Частота напряжения выбирается такой, чтобы за время, равное периоду $T = 1/f$, перемещение подвижного контакта и приращение его скорости не превышали заданных значений абсолютных погрешностей измерения указанных величин.

Измерительная цепь состоит из включенных последовательно ВДК и резистора R . Блок обработки преобразует действующие значения напряжений $u(t)$ и $u_R(t)$ в значения перемещения и скорости подвижного контакта ВДК.

Эквивалентная схема измерительной цепи (рисунок 3, б) учитывает паразитную емкость C_{Π} , обусловленную проводами и шинами, присоединенными к ВДК, а также входную емкость $C_{\text{вх}}$ блока обработки. Далее предполагается, что выходное сопротивление генератора и входное сопротивления блока обработки не оказывает существенного влияния на работу схемы (рисунок 3, а).

Комплексный коэффициент передачи измерительной цепи (рисунок 3, б) определяется по формуле

$$\dot{K}(f) = \frac{j2\pi f R(C_k + C_3 + C_{\Pi})}{1 + j2\pi f R(C_k + C_3 + C_{\Pi} + C_{\text{вх}})}.$$

Проанализируем модуль комплексного коэффициента передачи измерительной цепи

$$|\dot{K}(f)| = \frac{2\pi f R(C_k + C_3 + C_{\Pi})}{\sqrt{1 + [2\pi f R(C_k + C_3 + C_{\Pi} + C_{\text{вх}})]^2}}. \quad (2)$$

Обозначим составляющие емкости, которые не изменяются в процессе включения и отключения выключателя, в виде $C_1 = C_3 + C_{\Pi}$, $C_2 = C_3 + C_{\Pi} + C_{\text{вх}}$. Для определения этих величин достаточно выполнить измерение коэффициента передачи на двух частотах f_1 и f_2 , при разомкнутых контактах выключателя, составить систему из двух уравнений и решить ее относительно C_1 и C_2 .

Подставляя (1) в (2) и преобразуя относительно переменной x , получаем уравнение

$$x^2 + \frac{A[1 - BS^2]}{1 + D[1 - B^2S^2]^2} x - \frac{E[S^2 - 1]}{1 + D[1 - B^2S^2]^2} = 0, \quad (3)$$

где $S = 1/|\dot{K}(f)| = U/U_R$ — коэффициент ослабления измерительной цепи; $A = (2\pi f R)^2 \epsilon_0 \pi r_k^2 C_2$, $B = C_1/C_2$, $D = (2\pi f R C_2)^2$, $E = (2\pi f R \epsilon_0 \pi r_k^2)^2$ — коэффициенты, зависящие от параметров ВДК, сопротивления R и частоты f .

Поскольку в процессе включения и отключения выключателя величины, входящие в коэффициенты A , B , D и E , практически не изменяются, то их можно считать постоянными.

Решая уравнение (3) относительно x и учитывая, что физический смысл имеет только положительное значение x , получаем

$$x = -\frac{A[1 - BS^2]}{1 + D[1 - B^2S^2]^2} + \sqrt{\left[\frac{A[1 - BS^2]}{1 + D[1 - B^2S^2]^2}\right]^2 + \frac{E[S^2 - 1]}{1 + D[1 - B^2S^2]^2}}. \quad (4)$$

С учетом приведенных выше соотношений была разработана функциональная схема (рисунок 4) блока обработки выходных напряжений измерительной цепи.

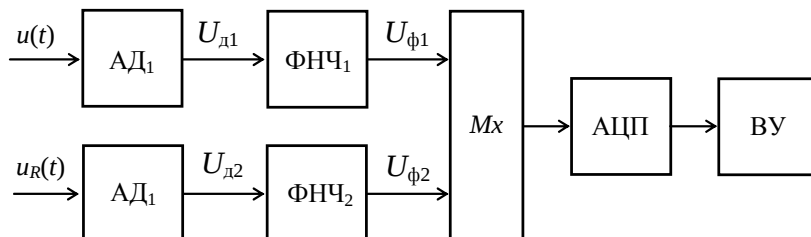


Рисунок 4 – Блок обработки выходных напряжений измерительной цепи

Амплитудные детекторы АД₁ и АД₂ преобразуют переменные напряжения $u(t)$ и $u_R(t)$ измерительной цепи (рисунок 3) в напряжения $U_{д1}$ и $U_{д2}$, законы изменения которых во времени повторяют огибающие указанных напряжений $u(t)$ и $u_R(t)$ соответственно. Фильтры нижних частот ФНЧ₁ и ФНЧ₂ подавляют высокочастотные помехи. С помощью мультиплексора Мх и аналого-цифрового преобразователя АЦП напряжения $U_{ф1}$ и $U_{ф2}$ преобразуются в цифровые сигналы и вводятся в вычислительное устройство ВУ, которое рассчитывает расстояние между контактами ВДК в соответствии с формулой (4), а также скорость, с которой перемещается подвижный контакт ВДК,

$$v \approx \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (5)$$

где Δx — перемещение подвижного контакта ВДК за время Δt .

Был разработан алгоритм (рисунок 5) обработки выходных напряжений измерительной цепи.

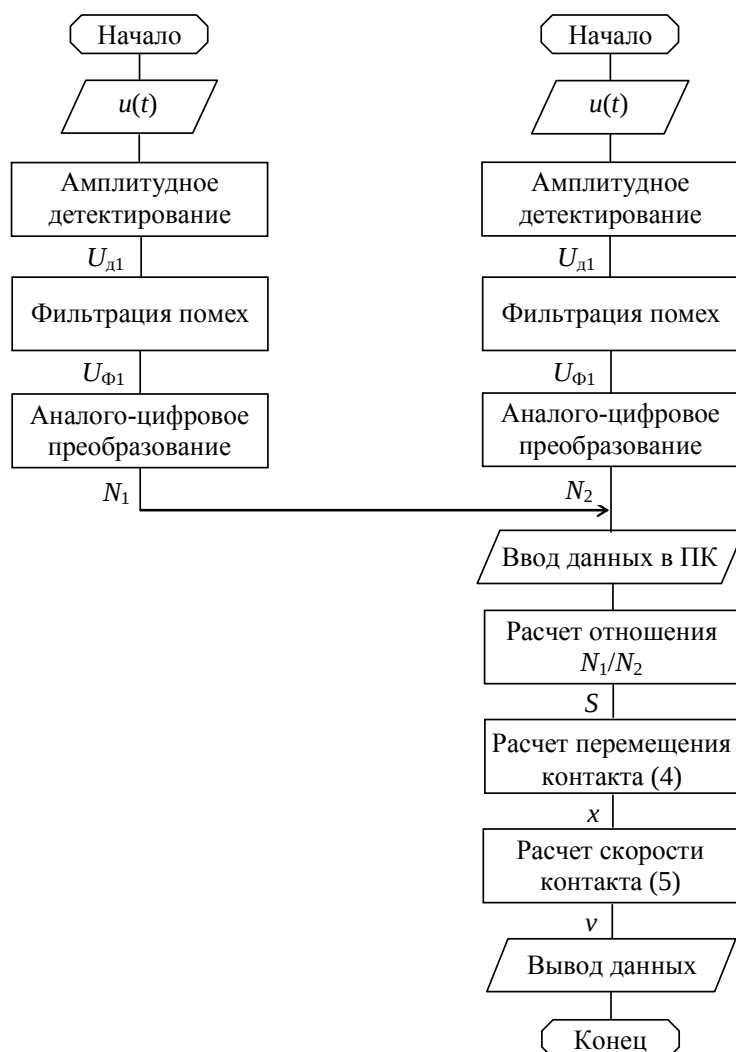


Рисунок 5 – Алгоритм обработки выходных напряжений емкостного датчика

С целью исследования возможностей практической реализации измерителя была собрана установка, структурная схема которой изображена на рисунок 6. С выхода генератора *Instek GFG 8210A* переменное напряжение u подается на подвижный контакт однополюсного вакуумного выключателя S типа *BB/TEL-10-20/1000*, выпускаемого промышленной группой “Таврида Электрик”. Напряжение u_R , снимаемое с резистора R , поступает на мультиметр *Keithley 2010*, который используется в качестве амплитудного детектора действующего значения напряжения. Для наблюдения и запоминания

временных зависимостей выходных напряжений генератора и мультиметра использовался запоминающий двухлучевой цифровой осциллограф *TDS 3052*.

Подавление высокочастотных помех, содержащихся в выходном сигнале мультиметра, осуществлялось с помощью цифрового ФНЧ второго порядка, смоделированного с помощью системы прикладных программ *Matlab*. Выходной сигнал цифрового фильтра обрабатывался персональным компьютером ПК с помощью пакетов программ *Mathcad* и *Excel*.

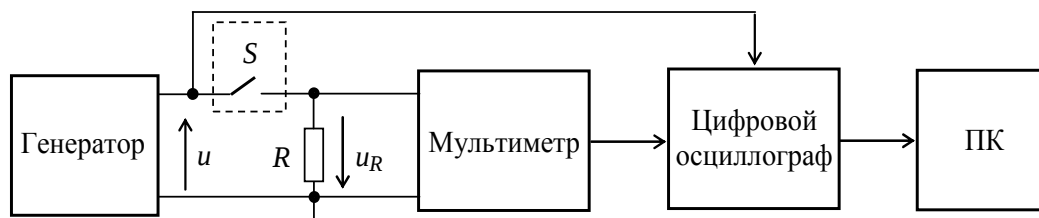


Рисунок 6 – Структурная схема установки для измерения параметров движения контакта ВДК

На рисунке 7 изображена временная диаграмма выходного напряжения мультиметра, полученная при включении выключателя.

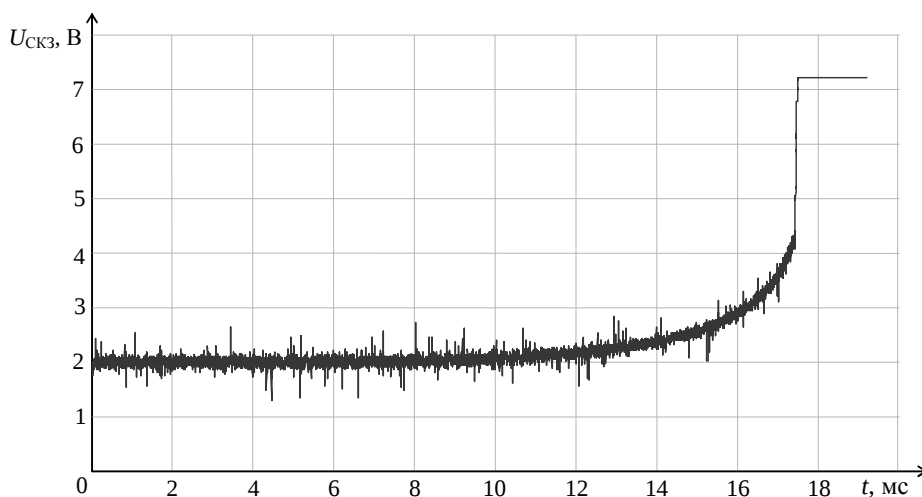


Рисунок 7 – Выходное напряжение мультиметра

На рисунке 8 изображена временная диаграмма выходного напряжения мультиметра после ее обработки цифровым ФНЧ второго порядка. Видно, что на выходе ФНЧ уровень высокочастотных помех значительно меньше по сравнению с его входом (рисунок 7).

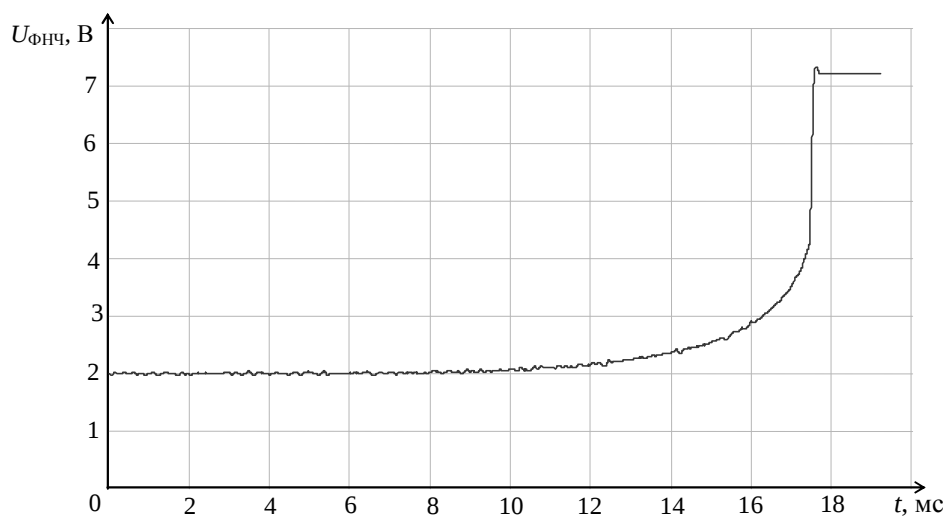


Рисунок 8 – Выходной сигнал цифрового ФНЧ

На рисунке 9 показаны временные диаграммы перемещения и скорости, рассчитанные по формулам (4) и (5) с использованием результатов измерений, полученных с помощью установки (рисунок 6) при включении выключателя.

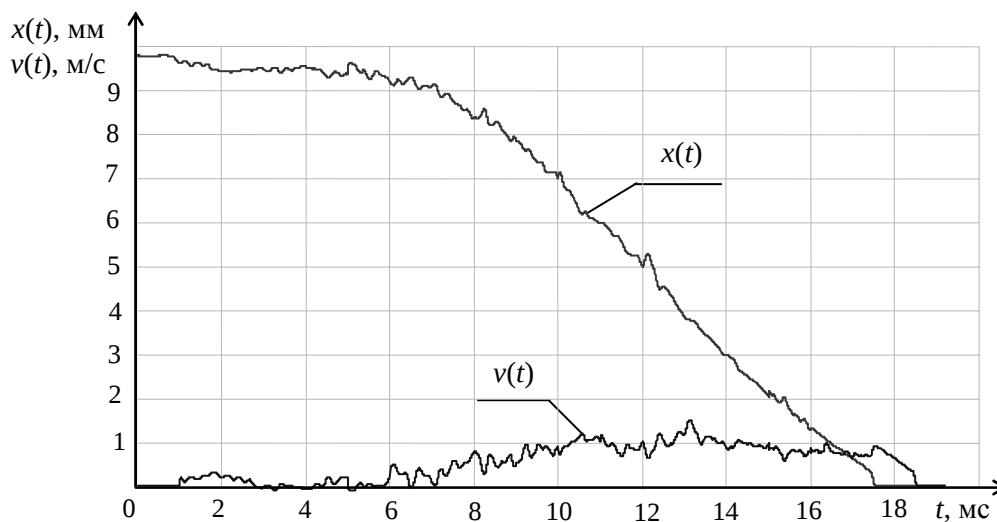


Рисунок 9 — Временные диаграммы перемещения и скорости, полученные с помощью установки (рисунок 6)

Для сравнения на рисунке 10 показаны аналогичные временные диаграммы, измеренные на постоянном токе с помощью потенциометрического резистивного датчика перемещения, установленного на механическом приводе подвижного контакта выключателя.

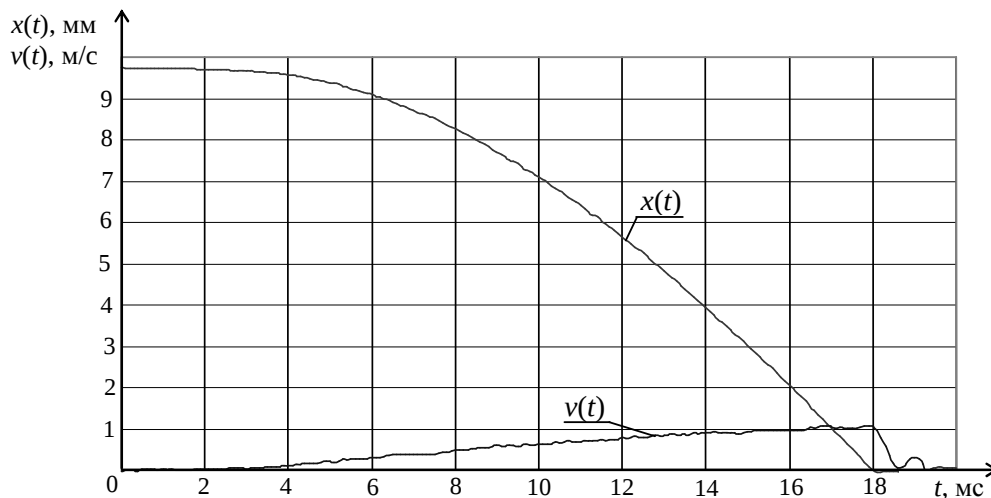


Рисунок 10 — Временные диаграммы перемещения и скорости, полученные с помощью резистивного датчика

Поскольку резистивный датчик перемещения питается постоянным напряжением, то паразитные реактивные параметры выключателя практически не оказывают влияния на его выходное напряжение.

Сравнивая рисунки 9 и 10, видно, что на интервале от 0 до 6 мс временные диаграммы перемещения и скорости подвижного контакта ВДК, полученные с помощью емкостного и резистивного датчиков, существенно отличаются. Это объясняется тем, что на указанном интервале межконтактная емкость ВДК меньше других емкостей измерительной цепи, а скорость подвижного контакта близка к нулю. В результате, межконтактная емкости изменяется незначительно и поэтому чувствительность измерительной цепи (рисунок 3, б) мала, в то время как чувствительность резистивного датчика не зависит от величины измеряемого перемещения. По мере уменьшения расстояния между контактами чувствительность измерительной цепи увеличивается, а погрешность измерения уменьшается.

Временные флуктуации скорости подвижного контакта, измеренной с помощью установки (рисунок 6), объясняются присутствием аддитивной помехи в выходном напряжении мультиметра.

Предложенный метод измерения параметров движения контакта выключателя является простым и удобным с точки зрения практической реализации и может найти применение при измерении параметров движения не только контактов выключателя, но и деталей различных механизмов. Разработанный измеритель не требует установки каких-либо дополнительных элементов на подвижные части механического привода выключателя и связанной с этим разборки выключателя, что в случае использования резистивного датчика является обязательным условием измерения.

В дальнейшем предполагается усовершенствовать алгоритм обработки сигналов, что позволит повысить точность измерителя.

Бibliографический список

1. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений / С.А. Спектор. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 320 с.
2. Атамаян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин / Э. Г Атамаян. — М.: Высш. шк., 1989. — 384 с.

Поступила в редакцию 23.02.2009 г.