

УДК 621.384

ОЦЕНКА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ СПОСОБА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ МЕТОДОМ ЕЕ ЗАРЯДА ФИКСИРОВАННЫМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

*канд. техн. наук, доц. А.С. ВЕРШИННИН, С.А. ШАЛАВИН
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты сравнительного анализа методической погрешности способов преобразования реальной электрической емкости во временной интервал методом ее прямого заряда, а также методом заряда-разряда емкости фиксированным постоянным током. Получены аналитические зависимости изменения напряжения на емкости во времени для процессов заряда и разряда емкости с учетом наличия сопротивления утечки реальной емкости. Получены аналитические выражения для абсолютной и относительной методической погрешности преобразования с учетом влияния сопротивления утечки. Приведены результаты вычислений методических погрешностей, выполненные для способов преобразования методом прямого заряда емкости и методом заряда-разряда емкости при одинаковых значениях параметров преобразования. По полученным результатам сделаны выводы и даны рекомендации по снижению методических погрешностей рассмотренных способов преобразования электрической емкости во временной интервал.

Введение. Измерительные преобразователи с емкостными датчиками находят широкое применение в системах автоматики. Поэтому задача измерения электрической емкости стоит не только перед приборами непосредственного измерения емкости, но и перед измерительными преобразователями различных технологических параметров с емкостными датчиками, таких как уровень, механические перемещения и др. При этом задача повышения точности измерений остается актуальной всегда.

Типовым способом измерения величины электрической емкости является частотный способ [1 – 3] с использованием включения измеряемой емкости в мостовую схему.

Способ измерения емкости методами ее заряда или разряда постоянным током [4] в технической литературе встречается крайне редко, хотя и обладает рядом преимуществ. Возможны способы измерения электрической емкости путем ее преобразования во временной интервал методом прямого заряда емкости фиксированным постоянным током [5], а также методом заряда-разряда емкости тем же фиксированным постоянным током.

Цель данной работы – провести сравнительный метрологический анализ методических погрешностей преобразования электрической емкости во временной интервал методом ее прямого заряда фиксированным постоянным током и методом заряда-разряда емкости тем же фиксированным током.

Методика оценки. В [5] описан измерительный преобразователь электрической емкости во временной интервал, в котором использован способ преобразования методом ее прямого заряда фиксированным постоянным током. Известно, что при заряде конденсатора C_X фиксированным постоянным током $I_G = const$, напряжение на конденсаторе растет линейно, а скорость изменения этого напряжения обратно пропорциональна величине емкости C_X :

$$U_C = \frac{I_G \cdot t}{C_X}, \quad (1)$$

где U_C – напряжение на конденсаторе C_X ; $I_G = const$ – ток заряда; t – время; C_X – величина электрической емкости конденсатора.

Суть способа преобразования иллюстрирует рисунок 1.

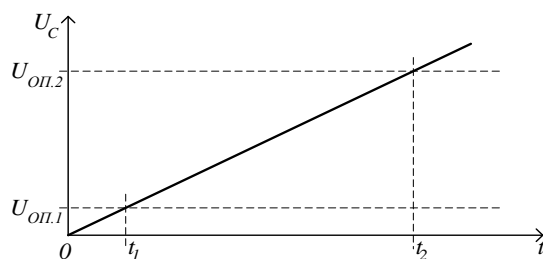


Рис. 1. Способ преобразования электрической емкости во временной интервал методом ее прямого заряда фиксированным постоянным током

Разность опорных напряжений $(U_{оп2} - U_{оп1}) = const$ определяет фиксированный интервал напряжений, на который должно измениться напряжение на конденсаторе U_C за время преобразования $\tau_0 = t_2 - t_1$. Таким образом, основное уравнение преобразования с учетом (1) принимает вид:

$$\tau_0 = \frac{(U_{оп2} - U_{оп1}) \cdot C_X}{I_G} \quad (2)$$

Этот способ преобразования электрической емкости во временной интервал сравнительно прост и удобен тем, что далее временной интервал легко преобразуется как в цифровую форму, так и в любой аналоговый вид сигнала. По сравнению с частотным способом измерения электрической емкости [1], рассматриваемый способ выгодно отличается линейностью закона преобразования (2) и более широким диапазоном измерений [5]. При определении метрологических характеристик такого преобразователя электрической емкости во временной интервал, кроме инструментальных погрешностей, следует учитывать и методические погрешности.

Из выражения (2) следует, что если преобразуемую емкость C_X считать идеальной, то методическая погрешность преобразования будет отсутствовать. При выполнении преобразования реальной емкости появляется методическая составляющая погрешности из-за влияния сопротивления утечки реального конденсатора. Кроме того, следует учесть входное сопротивление преобразовательной схемы, измеряющей напряжение U_C на обкладках конденсатора. Это входное сопротивление подключено параллельно сопротивлению R_{YT} реального конденсатора.

Таким образом, далее по тексту под сопротивлением R_{YT} будем понимать эквивалентное сопротивление параллельно включенных сопротивлений утечки реального конденсатора C_X и входного сопротивления измерительного преобразователя.

Эквивалентная схема замещения реального конденсатора [1] приведена на рисунке 2.

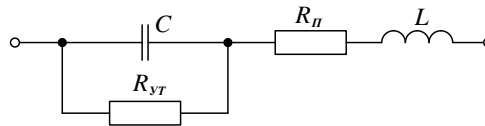


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения реального конденсатора

Поскольку заряд емкости выполняется постоянным током $I_G = const$, то индуктивность L не оказывает влияния. Последовательное сопротивление R_n также не оказывает заметного влияния, так как R_n мало и сила тока I_G тоже мала. Поэтому самое заметное влияние на результат преобразования оказывает сопротивление утечки R_{YT} .

В процессе прямого заряда емкости сопротивление R_{YT} проявляет себя тем, что возникающий при этом ток утечки I_{YT} будет уменьшать результирующий ток заряда. Тогда с учетом сопротивления R_{YT} заряд емкости C_X производится разностью токов $I_G = const$ и $I_{YT} = U_C(t)/R_{YT}$. Ток заряда равен

$$i(t) = I_G - \frac{U_C(t)}{R_{YT}} \quad (3)$$

Тогда функция изменения напряжения на емкости C_X с учетом (1) примет вид:

$$U_C(t) = \frac{1}{C_X} \left[\int_0^t I_G dt - \frac{1}{R_{YT}} \int_0^t U_C(t) dt \right] \quad (4)$$

Выражение (4) можно представить линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка:

$$\frac{dU_C(t)}{dt} + \frac{1}{C_X \cdot R_{YT}} \cdot U_C(t) - \frac{I_G}{C_X} = 0 \quad (5)$$

Решение уравнения (5) при нулевых начальных условиях $U_C(0) = 0$ имеет вид:

$$U_C(t) = I_G \cdot R_{YT} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{C_X \cdot R_{YT}}} \right) \quad (6)$$

Используя выражение (6), найдем моменты времени t_1 и t_2 , в которые напряжение на емкости $U_C(t)$ принимает значения соответственно $U_{оп1}$ и $U_{оп2}$. Тогда длительность интервала времени $\tau = t_2 - t_1$ равна

$$\tau = C_X \cdot R_{YT} \cdot \ln \left(\frac{I_G \cdot R_{YT} - U_{оп1}}{I_G \cdot R_{YT} - U_{оп2}} \right) \quad (7)$$

Вычитая выражение (2) из выражения (7) получим оценку абсолютной методической погрешности преобразования

$$\Delta\tau = \tau - \tau_0. \quad (8)$$

Оценка относительной методической погрешности преобразования

$$\delta_\tau = \frac{\Delta\tau}{\tau_0} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Результаты вычислений по выражениям (2), (7) – (9) для значений $U_{оп.1} = 1$ В, $U_{оп.2} = 5$ В, $C_X = 10$ мкФ, $I_G = 2$ мА и изменении R_{YT} от 2 МОм до 10 кОм приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты вычислений методической погрешности преобразования емкости во временной интервал методом ее заряда фиксированным постоянным током

R_{YT} , кОм	τ , с	τ_0 , с	$\Delta\tau$, с	δ_τ , %
2000	0,020015013	0,02	0,000015013	0,075065
1000	0,020030052	0,02	0,000030052	0,15026
500	0,020060207	0,02	0,000060207	0,301035
100	0,020305266	0,02	0,000305266	1,52633

Анализ таблицы 1 показал, что с уменьшением сопротивления R_{YT} методическая погрешность преобразования резко растет, что говорит о сильном влиянии сопротивления R_{YT} на указанную погрешность. Поэтому преобразование электрической емкости C_X во временной интервал методом прямого ее заряда фиксированным током $I_G = const$ применимо только при достаточно больших значениях сопротивления R_{YT} , 500 кОм и выше. И чем больше сопротивление R_{YT} , тем меньше методическая погрешность. Но методическую погрешность преобразования электрической емкости во временной интервал, возникающую из-за влияния сопротивления R_{YT} , можно значительно уменьшить, если применить метод заряда-разряда емкости фиксированным постоянным током. Суть способа преобразования иллюстрирует рисунок 3.

Полный цикл преобразования включает два такта. В первом такте выполняется заряд емкости фиксированным постоянным током $I_G = const$, так же как и в предыдущем способе. Во втором такте выполняется разряд емкости таким же фиксированным постоянным током $I_G = const$.

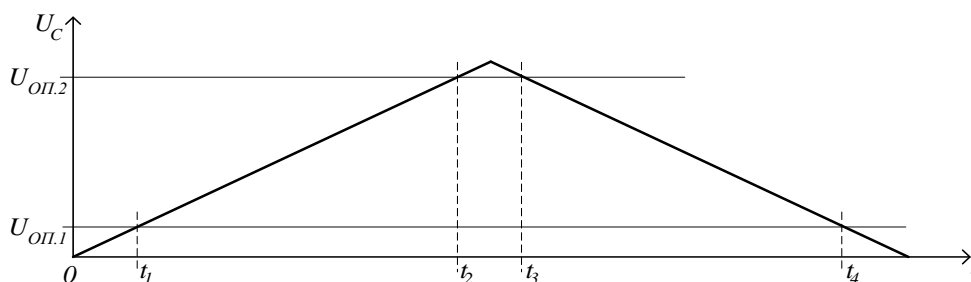


Рис. 3. Способ преобразования электрической емкости во временной интервал методом ее заряда-разряда фиксированным постоянным током

Результат преобразования получаем в виде суммы двух интервалов времени:

$$T = (t_2 - t_1) + (t_4 - t_3). \quad (10)$$

А уравнение преобразования для этого случая принимает вид:

$$T = \frac{2 \cdot (U_{оп.2} - U_{оп.1}) \cdot C_X}{I_G}. \quad (11)$$

Оценим влияние сопротивления R_{YT} на методическую погрешность преобразования электрической емкости во временной интервал для этого способа преобразования. Поскольку сопротивление R_{YT} проявляет себя и на этапе заряда, и на этапе разряда емкости, то возникающий при этом ток утечки I_{YT} на этапе заряда будет уменьшать результирующий ток заряда, а на этапе разряда – увеличивать результирующий ток разряда. Таким образом, в результате использования процессов заряда-разряда емкости на разных этапах влияние тока утечки I_{YT} , а значит и сопротивления R_{YT} , в значительной степени компенсируется.

Оценим это количественно:

- на первом этапе заряд емкости производится током $I_G = const$ и с учетом сопротивления R_{YT} напряжение на емкости изменяется согласно выражению (6). А интервал времени $\tau_1 = (t_2 - t_1)$ определяется выражением (7);

- на втором этапе разряд емкости C_X с учетом R_{YT} производится суммой токов $I_G = const$ и $I_{YT} = U_C(t)/R_{YT}$. Ток разряда равен:

$$i(t) = I_G + \frac{U_C(t)}{R_{YT}}. \tag{12}$$

Тогда функция изменения напряжения на емкости C_X с учетом (1) и (12):

$$U_C(t) = U_0 - \frac{1}{C_X} \cdot \left[\int_0^t I_G dt + \frac{1}{R_{YT}} \int_0^t U_C(t) dt \right]. \tag{13}$$

Выражение (13) можно представить линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка:

$$\frac{dU_C(t)}{dt} + \frac{U_C(t)}{C_X \cdot R_{YT}} + \frac{I_G}{C_X} = 0. \tag{14}$$

Решение уравнения (14) при начальных условиях $U_C(t=0) = U_0$ имеет вид:

$$U_C(t) = U_0 \cdot \ell^{-\frac{t}{C_X \cdot R_{YT}}} - I_G \cdot R_{YT} \left(1 - \ell^{-\frac{t}{C_X \cdot R_{YT}}} \right). \tag{15}$$

Используя выражение (15) найдем моменты времени t_3 и t_4 , в которые напряжение на емкости $U_C(t)$ принимает значения соответственно $U_{оп2}$ и $U_{оп1}$. Тогда длительность интервала времени $\tau_2 = t_4 - t_3$ равна

$$\tau_2 = C_X \cdot R_{YT} \cdot \ln \left(\frac{I_G \cdot R_{YT} + U_{оп2}}{I_G \cdot R_{YT} + U_{оп1}} \right). \tag{16}$$

Общий измеренный результат преобразования с учетом (7), (10) и (16) получим в виде:

$$T_u = C_X \cdot R_{YT} \cdot \ln \left[\left(\frac{I_G \cdot R_{YT} + U_{оп2}}{I_G \cdot R_{YT} - U_{оп2}} \right) \cdot \left(\frac{I_G \cdot R_{YT} + U_{оп1}}{I_G \cdot R_{YT} - U_{оп1}} \right) \right]. \tag{17}$$

Точное значение результата преобразования T_0 найдем из (11), полагая сопротивление $R_{YT} = \infty$.

$$T_0 = \frac{2 \cdot (U_{оп2} - U_{оп1})}{I_G} \cdot C_X. \tag{18}$$

Вычитая (18) из (17) получим оценку абсолютной методической погрешности преобразования:

$$\Delta T = T_u - T_0. \tag{19}$$

Оценка относительной методической погрешности преобразования методом заряда-разряда принимает вид:

$$\delta_T = \frac{\Delta T}{T_0} \cdot 100 \%. \tag{20}$$

Результаты вычислений по выражениям (17) – (20) для указанных ранее значений $U_{оп1}$, $U_{оп2}$, C_X , I_G и R_{YT} приведены в таблице 2. Вычисления выполнены с использованием программного обеспечения Mathcad с точностью до девяти знаков после запятой.

Таблица 2

Результаты вычислений методической погрешности преобразования емкости во временной интервал методом ее заряда-разряда фиксированным постоянным током

R_{YT} , кОм	τ , с	τ_0 , с	$\Delta\tau$, с	δ_{τ} , %
2000	0,040000026	0,04	0,000000026	0,0000650
1000	0,040000103	0,04	0,000000103	0,0002575
500	0,040000413	0,04	0,000000413	0,0010325
100	0,040010337	0,04	0,000010337	0,0258425

Из данных таблицы 2 видно, что с уменьшением сопротивления R_{VT} методическая погрешность преобразования также растет, что говорит о том, что полная компенсация влияния сопротивления R_{VT} не происходит. Но при этом наблюдается значительное уменьшение методических погрешностей.

Поскольку результаты вычислений, приведенные в таблицах 1 и 2, выполнены для одинаковых значений параметров $U_{ОП1}$, $U_{ОП2}$, C_X , I_G и R_{VT} , то из сравнения таблиц видно, что применение метода заряда-разряда для преобразования электрической емкости во временной интервал значительно снижает методическую погрешность от влияния сопротивления R_{VT} . Даже при $R_{VT} = 100$ кОм, указанная погрешность снижается почти в 60 раз. А при R_{VT} от 500 кОм и выше снижение погрешности происходит на два порядка и выше.

Выводы

1. Методическая погрешность преобразования электрической емкости C_X во временной интервал методом ее прямого заряда фиксированным постоянным током $I_G = const$ сильно зависит от сопротивления утечки R_{VT} . Поэтому такое преобразование применимо только при больших значениях сопротивления утечки R_{VT} ($R_{VT} = 500$ кОм и выше), и чем больше R_{VT} , тем меньше методическая погрешность.

2. Преобразование электрической емкости C_X во временной интервал методом ее заряда-разряда фиксированным током $I_G = const$ выгодно отличается от способа преобразования методом прямого заряда емкости значительно меньшим значением методической погрешности, так как на этапе разряда влияние сопротивления R_{VT} в значительной мере компенсируется. Поэтому такое преобразование имеет более широкие границы применимости. Даже при сопротивлении $R_{VT} = 100$ кОм методическая погрешность метода заряда-разряда более чем на порядок меньше, чем у метода прямого заряда при $R_{VT} = 500$ кОм.

3. Существенным отличием преобразования методом заряда-разряда емкости от преобразования методом заряда емкости фиксированным током является то, что длительность формируемого интервала времени для метода заряда-разряда емкости (11) в два раза больше, чем для метода прямого заряда емкости (2). Но это тоже можно отнести к достоинствам метода, так как увеличивается разрешающая способность преобразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метрология и радиоизмерения: учеб. для вузов / под ред. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2006. – 526 с.
2. Кушнир, Ф.В. Электрорадиоизмерения / Ф.В. Кушнир. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
3. Berkov, V. Metrologie industrielle / V. Berkov; Ed. Mir. – Moscou, 1987.
4. Курочкина, Л.А. Цифровой измеритель емкости оксидных конденсаторов / Л.А. Курочкина // Радио. – 1988. – № 8. – С. 50 – 52; № 9. – С. 52 – 53.
5. Вершинин, А.С. Измерительный преобразователь C/τ электрической емкости во временной интервал / А.С. Вершинин // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – С. 46 – 50.

Поступила 21.06.2010

ESTIMATION OF METHOD ERROR OF TRANSFIGURATION OF ELECTRIC CAPACITY IN TIME-FRAME BY THE METHOD OF ITS CHARGE WITH FIXED DIRECT CURRENT

A. VERSHININ, S. SHALAVIN

The results of comparative analysis of method error of transfiguration relaxation of real electric capacity in time-frame by the method of its straight charge, as well as by the method of charge-discharge of capacity with fixed direct current are given. Analytic dependences of voltage variation on capacity through time for processes of charge and discharge of the capacity with regard to the presence of leakage resistance of real capacity are achieved. Analytic expressions for absolute and relative method of error transformation with regard to the influence of leakage resistance are obtained. Calculation data of method error, carried out for transfiguration of relaxation method of directs charge of the capacity and charge-discharge method of the capacity under equal parameter values of transformation are given. According to the findings conclusions drawn and recommendations are given for lowering of method errors of the examined transfiguration relaxation of the electric capacity in the time-frame.