

Работа №3

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДКИ И РАЗРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА

Способность проводника накапливать заряды характеризуется его емкостью C :

$$C = \frac{q}{\varphi}, \quad (1)$$

где φ – потенциал проводника, имеющего заряд q . Уединенные проводники обладают небольшой емкостью. Технические устройства, обладающие значительной емкостью, называются конденсаторами. Конденсатор делают в виде двух проводников, помещенных близко друг к другу и разделенных диэлектриком. Образующие конденсатор проводники называют обкладками. Одной из обкладок сообщается положительный заряд q , а другой – равный ему по модулю отрицательный, с тем, чтобы поле было сосредоточено в промежутке между обкладками. Под емкостью конденсатора понимают величину, пропорциональную заряду q и обратно пропорциональную разности потенциалов между его обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}. \quad (2)$$

Разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ называют напряжением U между обкладками 1 и 2. Тогда (2) можно записать, как

$$C = \frac{q}{U}. \quad (3)$$

Для постоянного тока конденсатор представляет собой разрыв цепи, поскольку ток между обкладками не протекает. Однако при подключении конденсатора к источнику э. д. с. во внешней цепи кратковременно возникает ток, обеспечивающий заряд конденсатора. Ток кратковременно протекает через внешнюю цепь, соединяющую обкладки, и при разрядке заряженного конденсатора. В обоих случаях ток, очевидно, не может считаться постоянным. Однако изменения тока в цепи происходят не слишком быстро по сравнению со скоростью света c , с которой распространяются по цепи электромагнитные возмущения. То-

гда закон Ома, установленный для постоянного тока, можно считать справедливым и для мгновенных значений изменяющихся тока и напряжения.

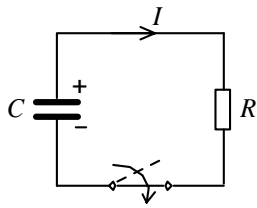


Рис. 1.

Рассмотрим случай, когда обкладки заряженного конденсатора емкости C в момент времени $t=0$ замыкаются через сопротивление R (рис. 1). Пусть I , q , U – мгновенные значения тока, заряда положительной обкладки и напряжения на конденсаторе. Считая ток положительным, когда он течет от положительной обкладки к отрицательной, запишем

$$I = -\frac{dq}{dt}. \quad (4)$$

Согласно закону Ома

$$RI = U. \quad (5)$$

Подставляя в (5) U , выраженное из (3), и I из (4), получим

$$-\frac{dq}{dt}R = \frac{q}{C}. \quad (6)$$

Разделяя переменные, запишем

$$\frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC}dt. \quad (7)$$

После интегрирования будем иметь

$$\ln q = -\frac{t}{RC} + \ln const, \quad (8)$$

где постоянная интегрирования взята в виде логарифма. Из (8) получим зависимость заряда конденсатора от времени:

$$q(t) = const \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (9)$$

Константу в (9) найдем из условия, что в момент времени $t=0$ конденсатор обладает начальным зарядом q_0 . Тогда окончательно будем иметь

$$q(t) = q_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (10)$$

где имеющее размерность времени произведение RC , обозначенное буквой τ , называют временем релаксации. Из (10) видно,

что τ есть промежуток времени, в течение которого заряд конденсатора уменьшается в e раз. Поскольку напряжение на конденсаторе пропорционально заряду, то его зависимость от времени будет аналогичной:

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (11)$$

где $U_0 = q_0/C$ – начальное напряжение на конденсаторе. Закон изменения тока найдем, подставляя (10) в (4):

$$I = -\frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (12)$$

где $I_0 = q_0/\tau$ – сила тока в момент $t=0$.

Теперь рассмотрим цепь, содержащую первоначально незаряженный конденсатор емкости C , включенный последовательно с сопротивлением R и источником э. д. с. ε (рис. 2). При замыкании ключа в момент времени $t = 0$ в цепи начинает протекать ток, заряжающий конденсатор. Ток будем считать положительным, когда он течет к положительно заряженной обкладке конденсатора, т.е.

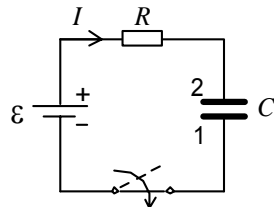


Рис. 2.

т.е.

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (13)$$

Применяя закон Ома для неоднородного участка цепи, запишем

$$RI = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon. \quad (14)$$

Учитывая, что поле в конденсаторе направлено от обкладки 2 к обкладке 1, для разности потенциалов между точками 1 и 2 будем иметь

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -U = -\frac{q}{C}. \quad (15)$$

Тогда, с учетом (13) и (15), соотношение (14) можно переписать, как

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon - q/C}{R}. \quad (16)$$

Введя обозначение $\varepsilon - q/C = u$ и разделяя переменные, получим уравнение

$$\frac{du}{u} = -\frac{1}{RC} dt. \quad (17)$$

Интегрируя, найдем

$$\ln u = -\frac{1}{RC} t + \ln const. \quad (18)$$

Таким образом, получаем:

$$u = const \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (19)$$

или, с учетом введенного обозначения,

$$\varepsilon - q/C = const \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (20)$$

где $\tau = RC$ – время релаксации.

Для определения константы заметим, что при $t=0$ конденсатор не заряжен, т.е. $q(0) = 0$. Тогда $const = \varepsilon$. Окончательно будем иметь для зависимости заряда на конденсаторе от времени:

$$q(t) = q_m (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (21)$$

где $q_m = \varepsilon C$ – предельное значение заряда на конденсаторе при $t \rightarrow \infty$.

Поскольку $U=q/C$, напряжение на конденсаторе при зарядке будет возрастать по тому же закону:

$$U(t) = \varepsilon (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (22)$$

асимптотически приближаясь к ε , а ток со временем согласно (13) и (21) будет экспоненциально убывать:

$$I = \frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (23)$$

где $I_0 = \varepsilon/R$ – сила тока в начальный момент.

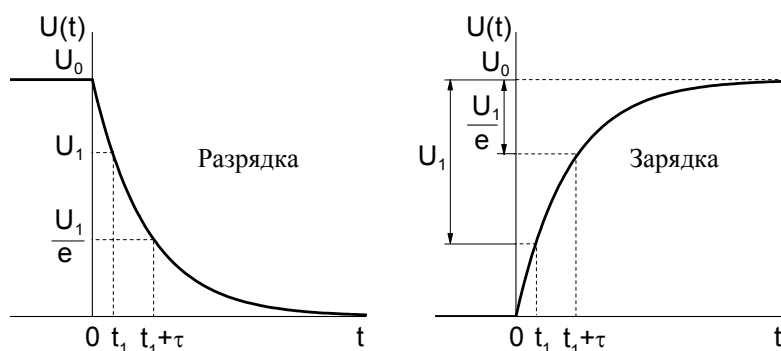


Рис. 3.

Графики зависимости напряжения на конденсаторе от времени в процессе разрядки (11) и зарядки (22) показаны на рис. 3 слева и справа, соответственно. Именно из этих зависимостей, наблюдаемых при помощи осциллографа, в лабораторной работе определяется время релаксации τ . При известных параметрах цепи (R и C) оно, очевидно, может быть получено и расчетным путем.

Оборудование и методика

Принципиальная схема используемой в работе установки приведена на рис. 4. Для зарядки и разрядки конденсатора используется периодический импульсный сигнал прямоугольной формы.

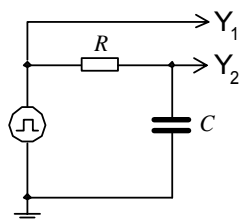


Рис. 4.

Конденсатор заряжается в течение длительности импульса и разряжается через выходную цепь генератора в промежутках между импульсами. Для того, чтобы конденсатор успевал практически полностью зарядиться до амплитудного значения импульса U_0 , длительность импульса $t_{\text{имп}}$ должна быть намного больше времени релаксации τ , а для обеспечения почти полной разрядки временной интервал между импульсами ($T - t_{\text{имп}}$, где T – период) должен существенно превышать τ . Сказанное проиллюстрировано на рис. 5, где показано

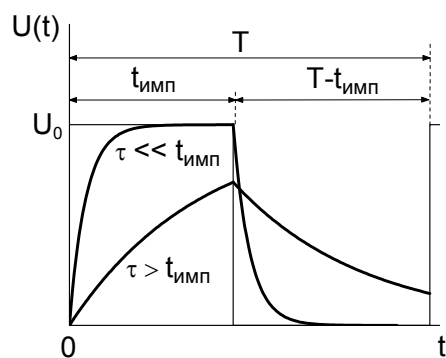


Рис. 5.

изменение напряжения на конденсаторе при различных соотношениях между τ и $t_{\text{имп}}$.

Для наблюдения одновременно входного сигнала прямоугольной формы и напряжения на конденсаторе в работе используется двухканальный осциллограф НМ400 (см. приложение в конце пособия с описанием принципов работы и органов управления осциллографа).

Сигнал прямоугольной формы (Y_1 на рис. 4) подается на один из каналов, а напряжение на конденсаторе (Y_2) – на другой. В результате на экране осциллографа наблюдается картинка, подобная показанной на рис. 5. Структурная схема установки приведена на рис. 6. Прямоугольные импульсы для зарядки конденсатора подаются с преобразователя ФПЭ-09, который формирует их из сигнала синусоидальной формы, поступающего на вход преобразователя от генератора ГЗ-106. Питание преобразователя осуществляется от внешнего источника. В конструкции преобразователя предусмотрена возможность грубой (клавишами) и точной (ручкой) регулировки скважности¹⁾ импульсов. Требуемые значения сопротивления и емкости устанавливаются в схеме при помощи соответствующих магазинов.

¹⁾ Скважностью называется отношение периода следования импульсов к их длительности.

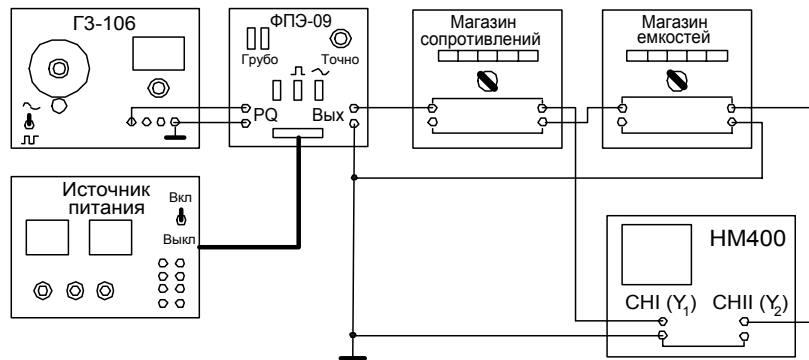


Рис. 6.

Выполнение работы

Подготовительные операции.

- 1) Собрать схему согласно рис. 6.
- 2) Включить в сеть генератор, осциллограф и блок питания преобразователя импульсов.
- 3) Установить генератор в режим синусоидальных колебаний с частотой 100 Гц и амплитудой около 1 В.
- 4) Нажатием клавиши «□□» - перевести преобразователь импульсов в режим генерации сигналов прямоугольной формы.
- 5) Выбрать на осциллографе режим Dual и добиться устойчивого изображения на экране прямоугольного сигнала, поступающего по первому каналу (СН I).
- 6) Наблюдая прямоугольный сигнал, установить его скважность ручками «Грубо» и «Плавно» преобразователя импульсов таким образом, чтобы длительность импульса (см. рис. 5) была максимальной.
- 7) Установить в схеме сопротивление 20 кОм и емкость 1 нФ.
- 8) Перемещая по вертикали изображения сигналов поступающих по каналам СН I и СН II, получить на экране осциллографа картинку, подобную показанной на рис. 5 для $\tau \ll t_{\text{имп}}$.

Упражнение 1. Определение времени релаксации из кривой разрядки конденсатора.

- 1) Перемещая по вертикали и горизонтали изображения сигналов, поступающих по каналам СНІ и СНІІ и подбирая длительность развертки и величину усиления в каналах, получить на экране осциллографа картинку, подобную показанной на рис. 7а.
- 2) Определить амплитуду напряжения U_0 в делениях шкалы и вычислить значение U_0/e .
- 3) Сместить сигналы по оси времени так, чтобы кривая разрядки конденсатора пересекала ось ординат при напряжении U_0/e (см. рис. 7б).
- 4) Определить время релаксации в делениях шкалы и перевести его в секунды.

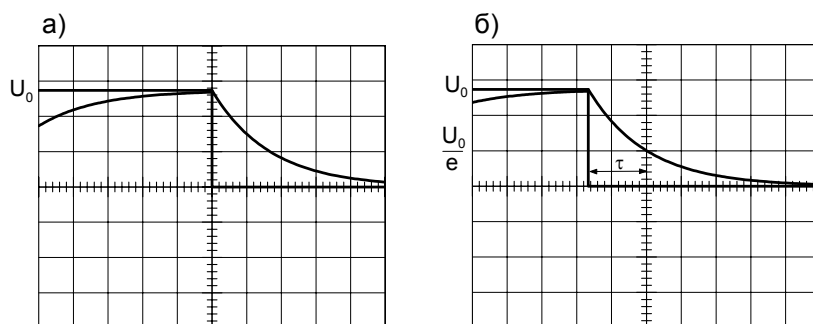


Рис. 7.

- 5) Оценить погрешность полученного значения времени релаксации. Принять погрешность преобразования для шкалы времени равной 3%, а погрешность измерения для шкал времени и амплитуд определить в половину деления шкалы.
- 6) Определить время релаксации по формуле $\tau = RC$. Принять погрешности R и C равными 10% и определить погрешность расчетного значения τ . Сравнить экспериментально полученное значение τ с величиной, полученной путем расчета.
- 7) Повторить упражнение для $R = 10$ кОм, $C = 3$ нФ и $R = 30$ кОм, $C = 2$ нФ.

Упражнение 2. Определение времени релаксации из кривой зарядки конденсатора.

- 1) Установить в схеме $R = 20$ кОм и $C = 1$ нФ. Перемещая по вертикали и горизонтали изображения сигналов, поступающих по каналам СН1 и СН2 и подбирая длительность развертки и величину усиления в каналах, получить на экране осциллографа картинку, подобную показанной на рис. 8а.
- 2) Определить амплитуду напряжения U_0 в делениях шкалы и вычислить значение U_0/e .
- 3) Сместить сигналы по оси времени так, чтобы кривая зарядки конденсатора пересекала вертикальную ось при напряжении $U_0 - U_0/e$ (см. рис. 8б).
- 4) Определить время релаксации в делениях шкалы и перевести его в секунды.

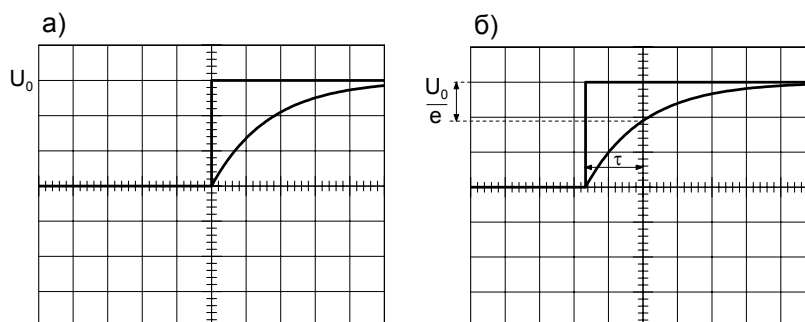


Рис. 8.

- 5) Оценить погрешность измерений и сравнить полученный результат с расчетным, следуя пунктам 5-6 упражнения 1.
- 6) Повторить упражнение для $R = 10$ кОм, $C = 3$ нФ и $R = 30$ кОм, $C = 2$ нФ.

Контрольные вопросы

- 1) Что такое емкость? В каких единицах она измеряется в системе СИ?
- 2) Получите и решите уравнения, описывающие изменение напряжения на конденсаторе при его зарядке и разрядке.
- 3) Что такое время релаксации?