



УДК 53.083.3

UDC 53.083.3

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ  
ПРОЦЕССОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ  
ТЕХНИКЕ****THE USE OF TRANSIENTS IN THE  
MEASUREMENT TECHNIQUE**

*А. А. Лаврентьев, Э. Н. Кленов,  
В. Г. Шифрин, В. И. Гаршин,  
А. А. Медвецкий*

*A. A. Lavrentev, E. N. Klenov, V. G. Shifrin,  
V. I. Garshin, A. A. Medvetskiy*

Донской государственный технический  
университет, Ростов-на-Дону,  
Российская Федерация

Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

[alavrentyev@spark-mail.ru](mailto:alavrentyev@spark-mail.ru)

[alavrentyev@spark-mail.ru](mailto:alavrentyev@spark-mail.ru)

[edbastron@yandex.ru](mailto:edbastron@yandex.ru)

[edbastron@yandex.ru](mailto:edbastron@yandex.ru)

[Vshifrin39@yandex.ru](mailto:Vshifrin39@yandex.ru)

[Vshifrin39@yandex.ru](mailto:Vshifrin39@yandex.ru)

[Vi\\_garshin@mail.ru](mailto:Vi_garshin@mail.ru)

[Vi\\_garshin@mail.ru](mailto:Vi_garshin@mail.ru)

Рассматривается оригинальный метод измерения индуктивности, защищенный патентом на изобретение, базирующийся на законе электромагнитной энергии накапливаемой реактивными элементами. Приводится ряд примеров схемного решения измерения индуктивности и емкости, в которых питание осуществляется источником постоянной ЭДС. Демонстрируется возможность измерения параметров реактивных элементов электрической цепи на базе переходных процессов при коммутациях в цепях постоянного тока.

The article considers the new method of inductance measuring, protected by an invention patent, which is based on the law of electromagnetic energy, accumulated by reactive elements. It provides several examples of circuits for measuring inductance and capacitance, in which a source of constant EMF is used as power supply. The paper demonstrates the possibility to measure parameters of the reactive elements of the electric circuit on the basis of transitional processes at switching in DC circuits.

**Ключевые слова:** измерения, индуктивность, емкость, переходные процессы, постоянный ток.

**Keywords:** measurement, inductance, capacitance, transient processes, DC

**Введение.** Основными параметрами реактивных элементов электрических цепей, в которых процессы определяются электромагнитными полями и описываются основными законами электродинамики, являются индуктивность и емкость [1]. Такие элементы являются базовыми частями современного электрического оборудования. Информация о количественных соотношениях индуктивностей и емкостей используется как при проектировании оборудования, так и в процессе его работы в виде вариаций, коррелируемых с контролируруемыми параметрами. С этим связано достаточно большое число методов измерения величин индуктивностей и емкостей, каждый из которых выбирается как оптимальный для решения конкретной задачи [2]. Определяющими выбора при этом могут быть экономические соображения, требования к надежности, качеству контроля, наличию требуемых элементов питания и другие факторы. Широкое распространение получили прямые методы: мостовые и метод непосредственной оценки и косвенные методы, основанные на использовании амперметра, вольтметра, ваттметра. Каждый

из них определяется своими задачами и средствами контроля. Основной особенностью большинства методов является требование наличия источника синусоидально изменяющейся ЭДС. При этом важным фактором являются стабильность частоты и амплитуды источников и, в ряде случаев, необходимости линейной или ступенчатой характеристики частоты источника [3,4]. Это создает определенные сложности в реализации контроля.

**Основная часть.** Для измерения параметров реактивных элементов электрической цепи можно использовать переходные процессы [5,6], что позволяет отказаться от источников синусоидальных напряжений, форма сигнала которого и частота существенно влияют на точность измерения. В [7,8] было показано, что для измерения индуктивности таким способом необходимо измерять электрический заряд. В предлагаемой статье показана возможность при использовании переходных процессов для измерения параметров реактивных элементов применения и других измерительных устройств.

Рассматриваемый далее способ базируется на законе электромагнитной энергии накапливаемой реактивными элементами. Величина энергии, накапливаемая индуктивностью  $L$ , определяется силой тока  $W_L = \frac{LI^2}{2}$ . Энергия, накапливаемая электроемкостью  $C$ , определяется напряжением на этой емкости и равна  $W_C = \frac{CU^2}{2}$ .

Рассмотрим электрическую цепь, представленную на рис. 1а.

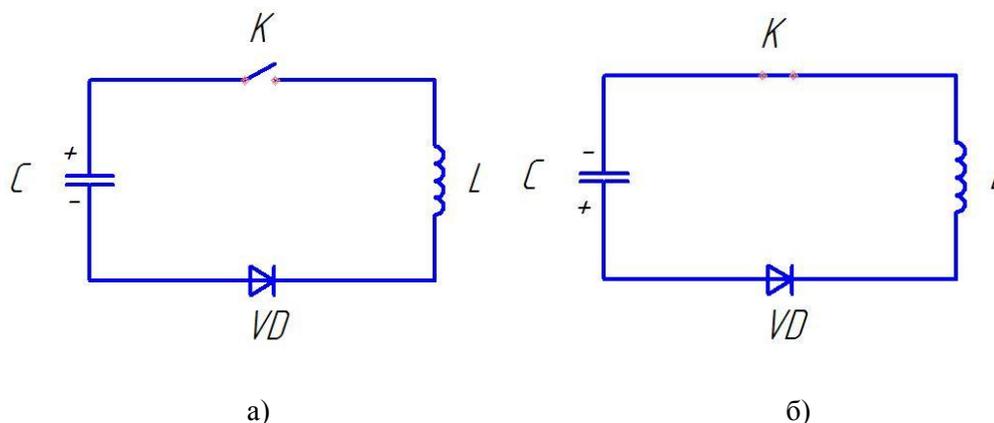


Рис. 1. Принципиальная схема для измерения параметров реактивных элементов цепи

При замыкании ключа  $K$  заряженный конденсатор  $C$  разряжается через индуктивность  $L$ . При полной перезарядке напряжение  $U_1$  на конденсаторе меняет знак на противоположный  $U_2$ . Благодаря диоду  $VD$  процесс перезарядки конденсатора заканчивается. В идеальном случае, когда элементы цепи не имеют активных потерь, напряжение на конденсаторе меняет только знак, но не величину. Поэтому  $U_1 = U_2$ . В этом процессе суммарная электромагнитная энергия индуктивности и емкости остается постоянной, переходя из энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно в энергию заряженного конденсатора (рис. 1, б). Таким образом, максимальные энергии заряженного конденсатора и индуктивности равны

$$\frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2},$$

где  $I_{\max}$  — максимальный ток,  
 $U_{\max}$  — максимальное напряжение.

$$\text{Поэтому } \frac{C}{L} = \frac{I_{\max}^2}{U_{\max}^2}.$$

При наличии активных потерь в схеме с реальными элементами при перезарядке конденсатора  $U_1 > U_2$ . Поэтому активные потери будут равны

$$W_{act} = \frac{CU_1^2}{2} - \frac{CU_2^2}{2}.$$

В одном из вариантов измерения индуктивности на базе информации о сигнале переходного процесса при разряде этой индуктивности на измеритель электрического заряда, в качестве индикатора могут быть использованы гальванометр, работающий в баллистическом режиме или веберметр (рис. 2).

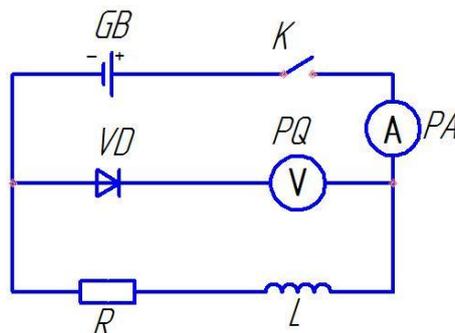


Рис. 2. Разряд индуктивности на измеритель электрического заряда через диод

Устройство содержит электрическую цепь, состоящую из измерителя прошедшего электрического заряда PQ, диода VD, амперметра PA, источника постоянного тока GB и ключа K. Диод включен в обратном направлении к источнику тока. Измеряемая катушка индуктивности, эквивалентная схема которой представлена активным сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$ , подключена к концам участка цепи, содержащей измеритель электрического заряда и диод.

При замыкании цепи, после окончания переходного процесса в обмотке катушки индуктивности устанавливается постоянный ток  $I$ . Через измеритель электрического заряда ток при этом не проходит, так как диод включен в обратном направлении к источнику тока. При размыкании ключа в течение переходного процесса ток в катушке индуктивности поддерживается ЭДС самоиндукции

$$e = -L \frac{di}{dt}.$$

Величина отброса стрелки измерителя электрического заряда показывает суммарный электрический заряд  $Q$ , прошедший через него в течение переходного процесса после отключения индуктивности от постоянного напряжения. По закону Ома  $e = iR$ .

$$\text{Поэтому } -L \frac{di}{dt} = iR,$$

где  $R$  — суммарное активное сопротивление цепи, состоящей из активных сопротивлений катушки индуктивности, измерителя заряда и диода.

$$-L \int_1^0 di = R \int i dt = R \int_0^Q dQ = R \cdot Q$$

$$\text{Откуда } L = \frac{R \cdot Q}{I}$$

Так как ток через диод при размыкании цепи течет в прямом направлении, сопротивлением диода можно пренебречь.

Закон изменения тока при этом описывается уравнением

$$i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{(R+R_u)t}{L}},$$

где  $R_u$  — сопротивление измерителя электрического заряда.

Заряд, прошедший через измеритель электрического заряда за время переходного процесса равен

$$Q = \int_0^{\infty} i dt = \int_0^{\infty} \frac{E}{R} e^{-\frac{(R+R_u)t}{L}} dt = \frac{EL}{R(R+R_u)}.$$

$$\text{Откуда } L = Q \frac{E + IR_u}{I^2}$$

Для повышения точности измерения индуктивности в измерительную цепь может быть включена калибровочная индуктивность  $L_{эм}$ , как показано на рис. 3.

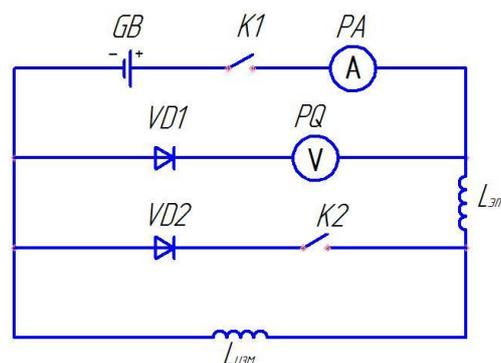


Рис. 3. Измерение индуктивности с помощью разряда через эталонную цепь

Устройство содержит электрическую цепь, состоящую из источника электродвижущей силы  $GB$ , ключа  $K1$ , к которым подключены две цепи. Одна содержит измеритель прошедшего электрического заряда  $PQ$  и диод  $VD1$ . Другая — параллельная — содержит эталонную катушку индуктивности  $L_{эм}$ , ключ  $K2$  и диод  $VD2$ . Аноды диодов соединены с отрицательным полюсом источника ЭДС. Измеряемая катушка индуктивности  $L_{изм}$  подключена к концам участка цепи, содержащей ключ  $K2$  и диод  $VD2$ .

При замыкании ключа  $K1$  в цепи амперметр  $PA$  показывает ток величиной  $I$ . При размыкании ключа  $K1$  ток в катушках  $L_{эм}$  и  $L_{изм}$ , замыкаясь через измеритель заряда  $PQ$  и диод  $VD2$ , открытый для этого направления тока, поддерживается суммарной ЭДС самоиндукции катушек  $L_{эм}$  и  $L_{изм}$  равной

$$E_c = -L_{изм} \frac{di}{dt} - L_{эм} \frac{di}{dt},$$

где  $L_{изм}$  и  $L_{эм}$  — индуктивности измеряемой и эталонной катушек соответственно.

Так как  $E_c = iR$ ,

где  $R$  — активное сопротивление цепи, состоящей из катушек индуктивности  $L_{изм}$  и  $L_{эм}$ ,

$$Edt = -Ldi - (L_{эм} + L_{изм}) \int_I^0 di = R \int_0^Q dq = RQ_1,$$

где  $Q_1$  — величина заряда, зарегистрированного измерителем прошедшего электрического заряда.

Таким образом,  $LI = RQ$  или  $L_{эм} + L_{изм} = \frac{RQ_1}{I}$ , где  $Q_1$  — величина заряда, зарегистрированного измерителем  $PQ$ .

После измерения  $Q_1$  замыкаются ключи К1 и К2, снова устанавливается ток  $I$ , так как диоды VD1 и VD2 при этом заперты. После размыкания ключа К1 ток в катушках  $L_{изм}$  и  $L_{эм}$ , замыкаясь через диод VD1 и измеритель заряда  $PQ$ , плавно уменьшается до нуля, поддерживаясь ЭДС самоиндукции только эталонной катушки  $L_{эм}$ , равной  $e_{cm} = -L_{эм} \frac{di}{dt}$ , поскольку ЭДС самоиндукции измеряемой катушки  $L_{изм}$  оказывается закороченной ключом К2 и диодом VD2, открытым для данного направления ЭДС. Поэтому аналогично выше приведенному получаем

$$L_{эм} = \frac{RQ_2}{I},$$

где  $Q_2$  — заряд, зарегистрированный измерителем электрического заряда в этом случае.

Таким образом, сравнивая полученные зависимости, получаем величину индуктивности, измеряемой катушки индуктивности  $L_{изм}$

$$L_{изм} = \left( \frac{Q_1}{Q_2} - 1 \right) \cdot L_{эм}.$$

Переходные процессы можно использовать также для измерения электрической емкости. Схема для измерения этого представлена на рис. 4,

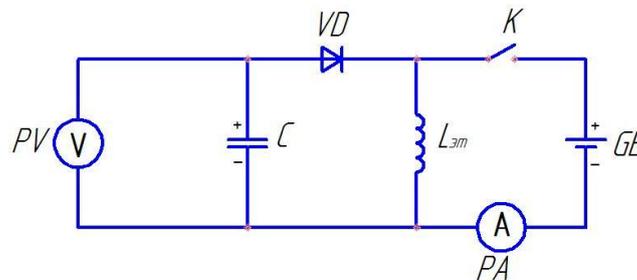


Рис. 4. Схема для измерения емкости

При замыкании ключа К через эталонную индуктивность  $L_{эм}$  проходит ток  $I$ , величина которого измеряется амперметром РА. При размыкании этого ключа ЭДС самоиндукции катушки  $L_{эм}$  заряжает конденсатор  $C$  до напряжения

$$U_c = \frac{Q}{C},$$

где  $Q$  — полный электрический заряд, прошедший через конденсатор  $C$ ,

$C$  — емкость конденсатора.

По закону сохранения электромагнитной энергии

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{CU^2}{2} + W_{\text{потерь}}.$$

Отсюда  $C = LI^2 - 2W_{\text{потерь}}$

Чтобы измерить потери, измеряемый конденсатор  $C$  надо заменить эталонным  $C_{\text{эт}}$ .

Подобную схему можно использовать для измерения индуктивности катушки (рис. 5).

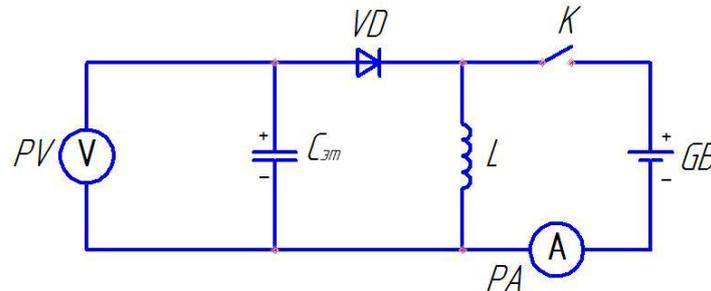


Рис. 5. Схема для измерения индуктивности катушки

При замыкании ключа  $K$  через измеряемую индуктивность  $L$  проходит ток  $I$ , величина которого измеряется амперметром  $PA$ . При размыкании этого ключа ЭДС самоиндукции катушки  $L$  заряжает эталонный конденсатор  $C_{\text{эт}}$  до напряжения

$$U = \frac{Q}{C_{\text{эт}}},$$

где  $Q$  — полный электрический заряд, прошедший через конденсатор  $C_{\text{эт}}$ .

Из закона сохранения электромагнитной энергии

$$L = \frac{C_{\text{эт}}U^2}{I^2} + \frac{W_{\text{потерь}}}{I^2}.$$

Переходные процессы позволяют непосредственно измерить активные потери катушки индуктивности. При перезарядке конденсатора от напряжения  $U_1$  до напряжения  $U_2$  противоположного знака потерянная энергия на активном сопротивлении будет равна:

$$W_{\text{потерь}} = \frac{C(U_1^2 - U_2^2)}{2}.$$

**Заключение.** Рассмотренный в статье материал показывает возможность измерения параметров реактивных элементов электрической цепи на базе переходных процессов при коммутациях в цепях постоянного тока. Возможности современной вычислительной техники позволяют реализовать рассмотренные в статье методы измерения параметров реактивных элементов в виде конечного результата [9,10].

#### Библиографический список.

1. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. — 4-е изд., т.3 — Санкт Петербург : Питер, 2003. — 377 с.
2. Атамалян, Э. Г. Приборы и методы измерения электрических величин: учебное пособие для студентов вузов / Э. Г. Атамалян. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Высшее образование, 2005. — 384 с.
3. Батищев, В. И. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений,



контроля, испытаний, диагностики / В. И. Батищев, В. С. Мелентьев. — Москва : Машиностроение-1, 2007. — 394 с.

4. Лушин, Е. В. Способы измерения индуктивности / Е. В. Лушин, А. Н. Долгов // Приволжский научный вестник. — 2013, №12-2 (28). — С. 36–40.

5. Мелентьев, В. С. Методы и средства измерения параметров электрических цепей на постоянном токе. / В. С. Мелентьев. // Известия высших учебных заведений, Приволжский регион. — 2008. — №2 — С. 80–90.

6. Мелентьев, В. С. Метод определения параметров катушки индуктивности по мгновенным значениям переходных процессов / В. С. Мелентьев, А. В. Цапаев, Е. В. Костенко // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании : сб. трудов VII-й всероссийской межвузов. научн. конф. — Самара, 2008. — С. 6–9.

7. Устройство для измерения индуктивности: патент 2131129 Росс. Федерация: [G01R27/26](#) / Э. Н. Кленов, В. Г. Шифрин. — заявл. 1994–08–01, опубл. 27.05.1999, бюл. № 2–2003. — 7 с.

8. Кленов, Э. Н. Измерение индуктивности с использованием переходных процессов / Э. Н. Кленов, В. Г. Шифрин // Совершенствование электрооборудования и экономия электроэнергии: сб. науч. трудов. — Ростов–на–Дону : РГСУ, 2006. — С. 39–43.

9. Prokhorov, L. G. Measurement of relaxation of electrical charge distribution on fused silica sample / L. G. Prokhorov, P. E. Khranchenkov, V. P. Mitrofanov // Phys. Lett. A. — 2007. — С. 45–149.

10. Фридман, А. Я. Метод управления прямым логическим выводом в интеллектуальных системах с дискретными доменами переменных / А. Я. Фридман, Б. А. Кулик, В. Г. Курбанов // Информационно-управляющие системы. — № 1(74)/2015. — С. 29–34.