

Владимир Дьяконов (г. Смоленск)

Цифровые измерители иммитанса E7-20/E7-25 и их применение

Копирование, тиражирование и размещение данных материалов на Web-сайтах без письменного разрешения редакции преследуется в административном и уголовном порядке в соответствии с Законом РФ.



В практике работы сервисных центров часто возникает необходимость в измерении резистивности (сопротивления) R , емкости C и индуктивности L цепей с сосредоточенными постоянными. Это связано с временным старением радиокомпонентов, отсутствием или повреждением их маркировки, необходимостью отбора нужных компонентов и необходимостью знать параметры нестандартных компонентов. При производстве компонентов нужно измерять их параметры множество раз и сортировать по отклонению измеряемого параметра. Для этого применяются самые различные приборы — от мультиметров до настольных измерителей R , L и C [1, 2].

В СССР выпускались измерители иммитанса E7-14 и E7-15. К настоящему времени они сильно устарели и их выпуск прекращен. Ниже описан современный цифровой измеритель иммитанса E7-20 [3], разработанный в Минском научно-исследовательском приборостроительном институте (МНИПИ) и признанный одной из лучших разработок двойного назначения Белорусского ВПК. Прибор представлен на российском рынке и по совокупности параметров является одним из лучших среди настольных измерителей параметров R , L и C . На его основе создан портативный вариант: прибор E7-25.

Вспомним некоторые теоретические сведения об измерении параметров реальных резисторов, индуктивностей и емкостей. Неидеальность емкости и индуктивности

учитывается их эквивалентными схемами. Обычно различают две эквивалентные схемы цепей: LR и CR (рис. 1) — последовательную и параллельную, будем обозначать их индексами s — от слова serial и p — от слова parallel).

Омическое сопротивление выводов и обкладок конденсаторов создают паразитное *последовательное сопротивление*, а сопротивление изоляции диэлектрика создает *параллельное сопротивление*.

Аналогично сопротивление обмотки катушки индуктивности порождает последовательное сопротивление, а потери в сердечнике порождают параллельное сопротивление. Эти параметры могут преобразовываться, так что достаточно вести измерения по двум указанным схемам (сокращенно они обозначены буквами s и p).

Цепи с реальными L и C (с потерями) характеризуются *полным сопротивлением*, называемым также *импедансом*. Это понятие имеет смысл только на переменном токе и характеризует комплексное отношение напряжения на измеряемой цепи к току в ней — $Z = U/I$. Полное сопротивление как комплексное число представляется в виде $Z = R_s + j \cdot X$, где R_s — активная составляющая Z , $j \cdot X$ — реактивная составляющая Z , j — мнимая единица (корень квадратный из -1). Часто вводится понятие модуля комплексного сопротивления:

$$|Z| = \sqrt{R_s^2 + X^2}, \text{ причем}$$

$R_s = |Z| \cos(\theta)$ и $X = |Z| \sin(\theta)$, где θ — сдвиг фазы между переменным напряжением и током измеряемой цепи. Реактивная составляющая Z для индуктивности и емкости определяется хорошо известными выражениями:

$$X = j \cdot 2\pi f L \text{ — для индуктивности}$$

и $X = 1/j \cdot 2\pi f C$ — для емкости.

Обратная Z величина — комплексная проводимость $G = 1/Z$ называется *адмитансом* цепи. Наконец, существует термин *иммитанс*, объединяющий понятие импеданса и адмитанса. Измерители иммитанса обычно являются самыми «продвинутыми» приборами для измерения параметров R , C , L , Z , G и др.

Поскольку все составляющие Z зависят от частоты, то первостепенным параметром измерений является тестовая частота f . В принципе желательно испытывать конденсаторы и катушки индуктивности на их рабочей частоте, например на частоте резонанса колебательных LCR-контуров. Однако на практике часто приходится ограничиваться несколькими частотами, а то и одной частотой.

Важное значение играют еще два параметра цепей на переменном токе — *тангенс угла потерь* δ — D и обратная ему величина — *добротность*. Для последовательной схемы измерений они определяются выражениями:

$$Q_L = \frac{1}{\operatorname{tg}(\delta)} = \frac{|X_s|}{R_s} = \frac{2\pi f L}{R_s}$$

и $Q_C = \frac{1}{\operatorname{tg}(\delta)} = \frac{|X_s|}{R_s} = \frac{1}{2\pi f C R_s}$.

Аналогично для параллельной схемы измерений имеем:

$$Q_L = \frac{1}{\operatorname{tg}(\delta)} = \frac{|X_p|}{R_p} = \frac{R_p}{2\pi f L}$$

и $Q_C = \frac{1}{\operatorname{tg}(\delta)} = \frac{|X_p|}{R_p} = 2\pi f C R_p R_p$.

Параметр D обычно используется для оценки неидеальности конденсаторов, а Q — катушек индуктивности. Однако, в принципе, оба параметра применимы как к конденсаторам, так и индуктивностям.

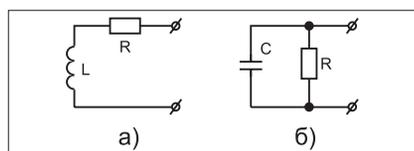


Рис. 1. Эквивалентные схемы LR- и CR-цепей

Современные настольные лабораторные RLC-измерители (например, LCR-816, LCR-817, LCR-827, LCR-819 и LCR-829 [1]) обеспечивают высокую точность (погрешность до 0,1% и менее) измерений в диапазоне частот до 100 кГц.

К сожалению, большинство приборов имеют ограниченный снизу диапазон измерения емкости и особенно — индуктивности. К тому же они измеряют на довольно низких и всего нескольких фиксированных частотах. Между тем, при проектировании современной аппаратуры (особенно в области СВЧ и импульсной техники) часто возникает необходимость измерения малых емкостей (доли-единицы пФ) и малых индуктивностей (доли-единицы нГн) с достаточно малой (менее 1%) погрешностью. Однако такая возможность у подавляющего большинства RLC-измерителей отсутствует.

Измеритель иммитанса E7-20 имеет уникально широкие диапазоны измеряемых параметров и высокую точность. Термины «импеданс» и «иммитанс» в названиях приборов для измерения параметров устройств с сосредоточенными постоянными R , L и C часто путаются. А между тем между измерителями импеданса и иммитанса есть и принципиальная разница — измерители иммитанса позволяют прямо измерять проводимость цепи, а измерители импеданса — нет.

Простейшим методом измерения импеданса цепей является метод вольтметра-амперметра. Однако он предполагает необходимость обеспечения очень малой погрешности задания напряжения на цепи и малую погрешность измерения тока. От этого недостатка избавлены мостовые методы измерения [2, 4], основанные на автоматической балансировке моста. Но они имеют другой существенный недостаток — работа всего на одной или реже — на нескольких частотах.

В основу работы прибора E7-20 положен оригинальный метод вольтметра-амперметра с применением для измерения иммитанса измерителя отношений — логометра [3]. Этот метод не требует стабильного источника напряжения и

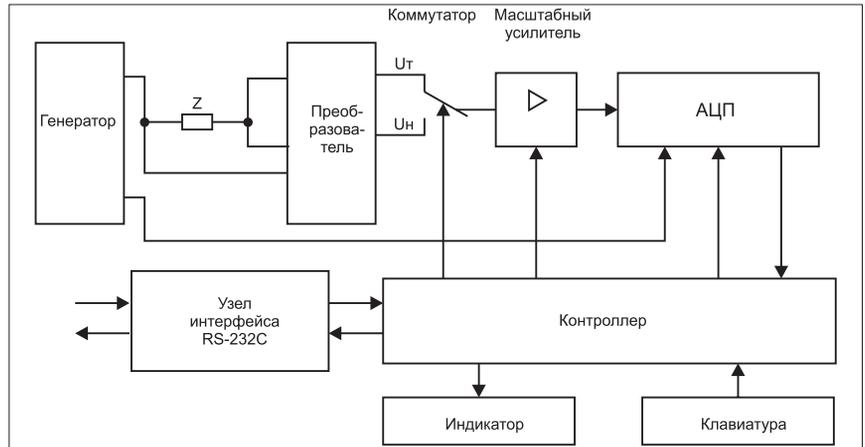


Рис. 2. Структурная схема измерителя иммитанса E7-20

мало чувствителен к его частоте. Структурная схема прибора приведена на рис. 2.

Как видно из рис. 2, напряжение рабочей частоты от генератора подается на измеряемую цепь (объект). Преобразователь формирует два напряжения, одно из которых (U_T) пропорционально току, протекающему через измеряемую цепь, другое (U_H) — напряжению на ней. Принцип измерения иллюстрирует векторная диаграмма, показанная на рис. 3. Отношение указанных напряжений равно комплексной проводимости (Y) или комплексному сопротивлению Z объекта.

Измерение отношения напряжений проводится аппаратно-программным логометром. Аппаратная часть логометра состоит из коммутатора, масштабного усилителя, аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Проекции векторов U_T , U_H на опорное напряжение $U_{оп}$ и $jU_{оп}$ (см. рис. 3) выделяются синхронным детектором (СД) и измеряются в некотором произвольном масштабе измерителем интегрирующего типа.

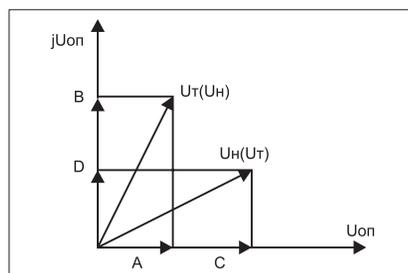


Рис. 3. Векторная диаграмма, поясняющая принцип измерения иммитанса

Очевидны соотношения:

$$Y = G + jB' = U_T/U_H = U_X/U_0 = (A + jB)/(C + jD),$$

где G — активная проводимость; B' — реактивная проводимость; U_X — числитель измеряемого отношения; U_0 — знаменатель измеряемого отношения; A , B , C , D — проекции векторов U_T и U_H на опорное напряжение $U_{оп}$ и $jU_{оп}$, откуда

$$G = (AC + BD)/(C^2 + D^2)$$

$$B' = (BC - AD)/(C^2 + D^2).$$

Аналогично

$$Z = R + jX = (A + jB)/(C + jD),$$

где R — активное сопротивление; X — реактивное сопротивление, или

$$R = (AC + BD)/(C^2 + D^2),$$

и

$$X = (BC - AD)/(C^2 + D^2).$$

При измерении высокоомных цепей (пределы $|Z|$ от 1 кОм до 10 МОм), когда генератор сигнала является источником напряжения, предпочтительнее осуществлять измерения в виде составляющих проводимости ($U_X = U_T$, $U_0 = U_H$). А в случае измерения низкоомных объектов, когда источник сигнала работает как генератор тока (пределы $|Z|$ от 1 до 100 Ом) более удобным является измерение в форме составляющих полного сопротивления ($U_X = U_H$, $U_0 = U_T$). Требуемая форма представления иммитанса достигается пересчетом из первичной формы (G , B' или X , R) и осуществляется контроллером. Расширение пределов измерения достигается за счет изменения коэффициента передачи усилительного тракта логометра при



Рис. 4. Внешний вид измерителя иммитанса E7-20

измерении составляющих числителя U_x в 10, 100 и 1000 раз.

Внешний вид измерителя иммитанса E7-20 показан на рис. 4. Прибор имеет вполне современный вид — большой ЖКИ индикатор и очень простое, но функционально полное управление с помощью небольшого числа клавиш. 4-проводная измерительная схема с выносными пробниками и автоматическая калибровка нуля обеспечивают возможность измерения очень малых значений L и C в широком диапазоне частот.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики цифровых измерителей иммитанса E7-20 и E7-25 с одними из измерителей AM-3001 (фирмы АКТАКОМ) и LCR-829 фирмы GOOD WILL.

К достоинствам E7-20 можно отнести заметно расширенный диапазон частот измерений и большая сетка частот, увеличенное число измеряемых параметров (измерение проводимости, реактивного сопротивления, угла фазового сдвига и тока утечки), более широкий диапазон внутреннего и внешнего напряжений источников смещения, меньшие габариты, вес и стоимость.

Базовая погрешность в 0,1% определяет минимальную погрешность в узком диапазоне изменения параметра $|Z|$. Пределы допустимой относительной основной погрешности по $|Z|$ при напряжении измерительного сигнала 1 В в режиме «Норма» соответствуют величинам, указанным в табл. 2.

Пределы допустимой относительной основной погрешности по $|Z|$ при $|Z|$ свыше 10 МОм до 1 ГОм определяются из выражения

$$\delta_z = \delta_{z1} |Z| / 10.$$

где δ_{z1} — пределы допустимой относительной основной погрешнос-

ти по $|Z|$ из табл. 2 на пределе 10 МОм; $|Z|$ — измеренное значение модуля комплексного сопротивления в МОм.

Пределы допустимой относительной основной погрешности по $|Z|$ при $|Z|$ от 0,01 МОм до 0,1 Ом определяются из выражения

$$\delta_z = 0,1 \delta_{z2} / |Z|,$$

где δ_{z2} — пределы допускаемой относительной основной погрешнос-

ти по $|Z|$ из табл. 2 на пределе 1 Ом.

Пределы допустимой основной относительной погрешности по $|Z|$ при напряжении измерительного сигнала менее 1 В определяются умножением значения предела из табл. 2 на $\sqrt{1/U}$, где U — напряжение измерительного сигнала в вольтах, установленное на табло прибора.

Таблица 1. Сравнительные характеристики измерителей иммитанса E7-20/E7-25 и приборов AM-3001, LCR-829

Параметр	E7-20/E7-25	AM-3001	LCR-829
Базовая погрешность	0,1% / 0,15%	0,05%	0,1%
Рабочие частоты	25-999 Гц (с шагом 1 Гц) и 0,1-1 МГц (с шагом 1 кГц)	100 и 120 Гц, 1, 10 и 100 кГц (всего 5 установок)	12 Гц — 100 кГц (503 установки)
Индуктивность	0,01 нГн — 10 кГн	0,1 нГн — 100 кГн	От 0,01 нГн до 99999 Гн
Емкость	0,001 пФ — 1 Ф	0,0001 пФ — 100 мФ	От 0,0001 пФ до 99999 мкФ
Активное сопротивление	0,01 МОм — 1 ГОм	0,1 МОм — 1 ГОм	От 0,01 МОм до 99999 кОм
Реактивное сопротивление	0,01 МОм — 1 ГОм	—	—
Проводимость	10^{-4} - 10^4	—	—
Тангенс угла потерь	10^{-4} - 10^4	0,00001-10	0,0001-9999
Добротность	10^{-4} - 10^4	0,00001-50	0,0001-9999
Модуль комплексного сопротивления	0,01 МОм — 1 ГОм	0,1 МОм — 2 ГОм	От 0,01 МОм до 99999 кОм
Угол фазового сдвига	-90° — +90°	—	—
Ток утечки	0,01 мкА — 10 мА	—	—
Время измерения	400 или 40 мс	100 мс (миним.)	34 мс
Напряжение смещения	0-40 В, 0-120 В	2 В, 0-40 В	2 В, 0-30 В
Габариты	298×127×300 мм 225×110×850 мм	109×363×386 мм	330×149×437 мм
Вес	4/0,8 кг	5,8 кг	5,5 кг
Интерфейс	RS-232	RS-232, GPIB	—

Таблица 2. Пределы допускаемой относительной основной погрешности по $|Z|$

Предел измерений $ Z $	Диапазон измерений $ Z $	Пределы допускаемой относительной основной погрешности δ_z , %, на частотах					
		25-99 Гц	100-999 Гц	1 кГц	1-10 кГц	10-100 кГц	100-1000 кГц
10 МОм	(1-10) МОм	±1,0	±0,6	±0,6	—	—	—
1 МОм	(0,1-1) МОм	±1,0	±0,3	±0,2	±0,5	—	—
100 кОм	(10-100) кОм	±0,5	±0,2	±0,1	±0,2	±0,9	—
10 кОм	(1-10) кОм	±0,5	±0,2	±0,1	±0,2	±0,5	±2,0
1 кОм	(0,1-1) кОм	±0,5	±0,2	±0,1	±0,2	±0,5	±1,0
100 Ом	(10-100) Ом	±0,6	±0,3	±0,2	±0,3	±0,5	±1,5
10 Ом	(1-10) Ом	±1,0	±0,5	±0,3	±0,4	±0,8	±3,0
1 Ом	(0,1-1) Ом	±1,0	±0,7	±0,4	±0,4	±0,9	—

Пределы допустимой относительной основной погрешности по $|Z|$ в режиме «БЫСТРО» находятся умножением значения предела из табл. 2 на три.

Для определения диапазона измерений $|Z|$ при измерении емкости или индуктивности модуль комплексного сопротивления $|Z|$ определяется по формулам:

$$|Z_L| = |2\pi fL| \text{ и } |Z_C| = |1/2\pi fC|,$$

где f — рабочая частота, C (L) — измеренное значение емкости (индуктивности).

Пределы допустимых основных погрешностей по $R_p, R_s, L_p, L_s, C_p, C_s, X_s, G_p, D, Q, j, I$ соответствуют значениям, приведенным в табл. 3.

Дополнительная погрешность измерений, вызванная изменением температуры окружающего воздуха от нормальной до любой в пределах рабочих условий применения на каждые 10°C , не превышает половины предела допускаемой основной погрешности.

Для проведения измерений измеритель иммитанса E7-20 поставляется с двумя устройствами присоединительными (далее УП). УП1 предназначено для подключения объектов с аксиальными выводами. Оно имеет две клеммы, каждая из двух прижимных контактов. Важно, что бы подсоединенный объект выводами касался всех четырех прижимных контактов, которые (с помощью прилагаемого комплекта коаксиальных кабелей) подключаются к разъемам I, U, I', U' на передней панели измерителя. Для обеспечения возможности измерения трехзажимных объектов на УП-1 установлена корпусная клемма «земля». Общая схема измерения трехзажимных объектов показана на рис. 5.

Перед проведением измерений с УП-1 необходимо установить нужное расстояние между контак-

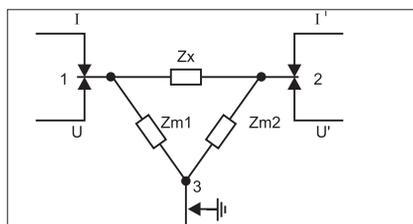


Рис. 5. Схема измерения трехзажимных объектов

Таблица 3. Пределы допускаемых погрешностей по $R_p, R_s, L_p, L_s, C_p, C_s, X_s, G_p, D, Q, \varphi, I$

Измеряемый параметр	D, Q	Пределы допустимой основной погрешности
R_s, R_p, G_p	$Q \leq 0,1$	$\delta_R = \delta_G = \delta_Z$
	$Q > 0,1$	$\delta_R = \delta_G = \delta_Z \cdot (1 + Q)$
L_s, L_p	$D \leq 0,1$	$\delta_L = \delta_Z$
	$D > 0,1$	$\delta_L = \delta_Z \cdot (1 + D)$
C_s, C_p	$D \leq 0,1$	$\delta_C = \delta_Z$
	$D > 0,1$	$\delta_C = \delta_Z \cdot (1 + D)$
X_s	$D \leq 0,1$	$\delta_X = \delta_Z$
	$D > 0,1$	$\delta_X = \delta_Z \cdot (1 + D)$
D	$D \leq 1$	$\Delta_D = (\delta_Z / 100\%) \cdot (1 + 10D)$
	$D > 1$	$\delta_D = \delta_Z \cdot (10 + D)$
Q	$Q > 1$	$\delta_Q = \delta_Z \cdot (10 + Q)$
	$Q \leq 1$	$\Delta_Q = (\delta_Z / 100\%) \cdot (1 + 10Q)$
φ	—	$\Delta_\varphi = (\delta_Z / 1\%) \cdot 1^\circ$
I	—	$\delta_I = \pm(3 + 10 \text{ мкА/А}) \%$

ными зажимами и произвести коррекцию нуля холостого хода при отсутствии измеряемого объекта и коррекцию нуля короткого замыкания при закороченных перемычкой контактных зажимах. Перемычка утоплена в корпусе УП-1.

УП-2 применяется для измерения параметров объектов, конструкция которых не обеспечивает удобства их подключения к УП-1. Так как изменение положения зажимов приводит к изменению собственной индуктивности УП-2, его рекомендуется использовать только в тех случаях, когда изменением индуктивности УП-2 можно пренебречь, а также на частотах не выше 100 кГц. УП-2 подключается непосредственно к прибору через разъемы в соответствии с маркировкой. Перед измерениями с использованием УП-2 необходимо провести коррекцию нуля.

При этом коррекция нуля холостого хода должна проводиться при отсутствии измеряемого объекта, а коррекция нуля короткого замыкания — при закороченных проводником зажимах, расположенных вплотную.

При измерении объектов трехзажимной конструкции экранированный вывод объекта нужно подключать к корпусному выводу УП-2. На рис. 6 представлено несколько примеров подключения к измерителю различных объектов и измерение их

параметров при использовании трехзажимной конструкции подключения: а — измерение емкости экранированного конденсатора, б — измерение емкости между экранированными обмотками трансформатора, в — измерение емкости между экранированными контактами реле, г — измерение фазировки обмоток трансформатора и коэффициента трансформации, д — измерение проходного иммитанса резистора или конденсатора с влагозащитным пояском и е — измерение индуктивности вывода компонента.

Через прилагаемый интерфейсный кабель прибор может быть подключен к порту RS-232 персонального компьютера. С сайта разработчика можно скачать программное обеспечение, поддерживаю-

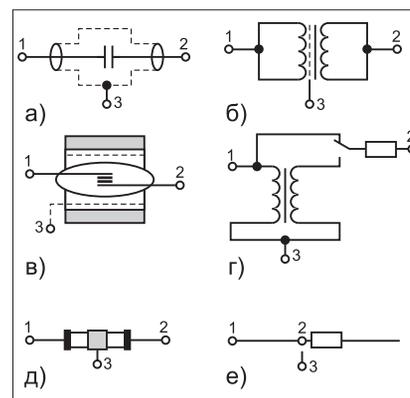


Рис. 6. Примеры подключения к измерителю различных объектов



Рис. 7. Окно программы для подключения измерителя E7-20 к персональному компьютеру

дшее связь прибора с компьютером. На рис. 7 показано окно программы. Она выводит копию экрана измерителя иммитанса и имеет группу клавиш, обеспечивающих управление прибором от компьютера. Последнее позволяет создавать автоматизированные комплексы для измерения параметров объектов с сосредоточенными постоянными и осуществлять из разбраковку.

Программное обеспечение измерителя E7-20 не вполне доработано. Так, нельзя устанавливать заданные пользователем размеры окна, полное открытое окно имеет большое пустое пространство, нет возможности вывода графических зависимостей измеряемых параметров от времени и температуры. Впрочем, это может сделать пользователь, в

частности, используя современные системы компьютерной математики Mathcad, MATLAB и др., графические возможности которых и средства обработки данных превосходны и вряд ли уже будут превзойдены. В инструкции по работе с прибором [3] можно найти данные о деталях текстового формата файлов.

В целом приятно отметить, что белорусские разработчики из МНИПИ создали прибор, который на постсоветском пространстве решает все основные задачи измерения параметров цепей с сосредоточенными постоянными. Недавно освоен выпуск малогабаритного измерителя иммитанса E7-25 (рис. 8). Он имеет основную погрешность измерения 0,15%, уменьшенную до 5 Вт потребляемую мощность и возможность батарейного питания. Основные параметры прибора приведены в табл. 1.

В заключение можно сказать, что мы получили измерители иммитанса, которые по своей точности и функциональности находятся среди лучших мировых образцов



Рис. 8. Внешний вид малогабаритного измерителя иммитанса E7-25

приборов данного типа и в то же время имеют заметно меньшую стоимость.

Литература

1. Дедюхин А. А. Обзор современных измерителей импеданса (измерители RLC). <http://www.prist.ru/info.php/articles/lcr-meters.htm>.
2. Афонский А. А. Измерители импеданса АКТАКОМ. Контрольно-измерительные приборы и системы. № 4, 2007.
3. Измеритель иммитанса E7-20. Руководство по эксплуатации. Минск, ОАО «МНИПИ».
4. Измерения в электронике. Справочник/Кол. авторов под ред. В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987.

Издательство «СОЛОН-ПРЕСС» представляет

Описана практика применения промышленных программируемых контроллеров, широко применяющихся для автоматизации производства. Излагаются языки программирования на основе действующего стандарта МЭК 61131-3 и многочисленные примеры подготовки программ для промышленных программируемых контроллеров.

Для специалистов по автоматизации производственных процессов и производственного оборудования, а также для студентов и преподавателей высших технических заведений.



Наложенным платежом цена — 360 руб.

КАК КУПИТЬ КНИГУ

Заказ оформляется одним из двух способов:

1. Пошлите открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20.

2. Оформите заказ на сайте www.solon-press.ru в разделе «Книга-почтой» или «Интернет-магазин».

Бесплатно высылается каталог издательства по почте.

При оформлении заказа полностью укажите адрес, а также фамилию, имя и отчество получателя.

Желательно указать дополнительно телефон и адрес электронной почты. С полным перечнем и описанием книг можно ознакомиться на сайте

www.solon-press.ru

по ссылке

<http://www.solon-press.ru/kat.doc>

Телефон: (495) 254-44-10, 8 (499) 795-72-03.

Цены для оплаты по почте наложенным платежом действительны до 01.12.2008.